

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-фізичний факультет
Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Є.В. Іващенко

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

**на тему: «Формування впорядкованої фази L1₀ в нанорозмірних плівках
FePt-Ag.»**

Виконав:

студент II курсу, групи ФМ-81мп

Редчиць Дмитро Олександрович _____

Керівник:

Професор, д.т.н.

Макогон Ю.М. _____

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Доцент, к.е.н.

Петренко К.В. _____

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

Професор, д.т.н.

Левченко О.Г. _____

Консультант з нормоконтролю:

Асистент

Шаповалова Н.А. _____

Рецензент:

Старший викладач, к.т.н.

Аршук М.В. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Є.В. Іващенко

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Редчицю Дмитру Олександровичу

1. Тема дисертації «Формування впорядкованої фази $L1_0$ в нанорозмірних плівках FePt-Ag.», науковий керівник дисертації Макогон Юрій Миколайович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «12» листопада 2019 р. № 3890-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: плівкові композиції FePt-Ag
4. Вихідні дані: літературні дані та результати особистих експериментів
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Дослідити закономірності дифузійного формування структури та фазового складу нанорозмірних плівкових композицій FePt-Ag при термічній обробці у вакуумі. 2. Зробити висновки на основі отриманих експериментальних даних.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: зображення мікроструктур, графіки, таблиці.
7. Орієнтовний перелік публікацій: тези: немає
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Петренко К.В, доцент		
Охорона праці за безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., професор		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Видача завдання		
2	Проведення та написання літературного огляду		
3	Освоєння методик дослідження		
4	Виконання експериментальних досліджень		
5	Отримання результатів		
6	Написання висновків		
7	Оформлення роботи		
8	Оформлення презентації та написання доповіді		
9	Попередній захист		
10	Захист на засіданні ЕК		

Студент

Редчиць Д.О

Науковий керівник дисертації

Макогон Ю.М

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 75 сторінок, 36 рисунків, 12 таблиць, 36 літературних джерел.

ТОНКА ПЛІВКА, ПЛАТИНА, ЗАЛІЗО, СРІБЛО, СЕРЕДОВИЩЕ,
ВІДПАЛ, МОРФОЛОГІЯ, ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, МІКРОСКОПІЯ

Об'єкт досліджень: процеси фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях FePt.

Предмет досліджень: нанорозмірні плівкові композиції FePt-Ag, отримані магнетронним методом.

Мета досліджень: дослідити структурно-фазові перетворення в нанорозмірних плівкових композиціях FePt-Ag при різному розташуванню шару срібла при відпалі в вакуумі.

Методи досліджень: рентгеноструктурний фазовий аналіз(ULTIMA IV), атомно-силова мікроскопія (Digital Instruments Dimension 3000), SQUID магнітометрія (MPMS SQUID VSM).

Наукова новизна одержаних результатів: полягає в тому, що:

1. Визначено, що розташування шару срібла впливає на початковий напружений стан, а відповідно і на температуру початку формування упорядкованої фази $L1_0$.
2. Встановлено, що в плівкових композиціях з проміжним шаром Ag фазове перетворення $A1\text{ FePt} \rightarrow L1_0\text{ FePt}$ відбувається при температурі 700 °C, що на 100 °C нижче, порівняно з плівковими композиціями з верхнім та нижнім шаром Ag.

Сфера застосування: електроніка, інформаційні-технології.

ANNOTATION

Master's dissertation: 75 pages, 36 figures, 12 tables, 36 literary sources

THIN FILM, PLATINUM, IRON, SILVER, ENVIRONMENT, ANGLE,
MORPHOLOGY, PHASE TRANSFORMATION, MICROSCOPY

Object of research: phase formation processes in nanoscale Fe / Pt film compositions.

Research subject: FePt-Ag nanosized film compositions obtained by magnetron method.

The purpose of the research: investigate the structural-phase transformations of non-dimensional FePt-Ag film compositions with different arrangement of the silver layer upon annealing in vacuum.

Research Methods: X-ray Structural Phase Analysis (ULTIMA IV), Atomic Force Microscopy (Digital Instruments Dimension 3000), SQUID Magnetometri (MPMS SQUID VSM).

The scientific novelty of the results obtained: is that:

1. It is determined that the location of the silver layer affects the initial stress state and, accordingly, the start temperature of the ordered phase $L1_0$.
2. It is established that in the film compositions with the Ag intermediate layer, the $A1 \text{ FePt} \rightarrow L1_0 \text{ FePt}$ phase transformation takes place at 700°C , which is on 100°C lower compared to the upper and lower Ag film compositions.

Fields of application: electronics and information technology.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Історія розвитку запису на жорсткі диски	10
1.2 Технології магнітного запису	11
1.2.1 Повздовжний магнітний запис	11
1.2.2 Перпендикулярний магнітний запис.....	12
1.2.3 Термічно активований магнітний запис	14
1.3 Перспективи використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt в якості середовища магнітного запису	15
1.4 Висновок до розділу 1.....	16
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	17
2.1 Матеріали дослідження	17
2.1.1 Магнетронний метод одержання плівкових матеріалів	17
2.1.2 Термічна обробка.....	19
2.2 Методика дослідження	19
2.2.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз.....	20
2.2.2 Атомно-силова мікроскопія.....	22
2.2.3 Магнітно-силова мікроскопія	25
2.2.4 SQUID магнітометрія	26
2.3 Висновки до розділу 2	27
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	28
3.1 Рентгеноструктурний аналіз	28
3.2 Атомно-силова мікроскопія	35
3.3 SQUID магнітометрія.....	38
3.4 Пошаровий хімічний аналіз плівкових композицій Fe ₅₀ Pt ₅₀ (15 нм)/Ag(7,5 нм)/ Fe ₅₀ Pt ₅₀ (15 нм) та Fe ₅₀ Pt ₅₀ (15 нм)/Ag(7,5 нм)	44
3.5 Висновки до розділу 3	46
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	48
4.1 Опис ідеї проекту	48

	7
4.2 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження	48
4.2.1 Визначення заробітної плати персоналу	49
4.2.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску	51
4.2.3 Визначення вартості матеріалів	51
4.2.4 Визначення вартості спеціального обладнання і приладів.....	51
4.2.5 Визначення витрат на службові відрядження.....	51
4.2.6 Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій	51
4.2.7 Визначення інших прямих неврахованих витрат	52
4.2.8 Визначення накладних витрат	52
4.2.9 Визначення планової кошторисної вартості науково-дослідної роботи	52
4.3 Висновки до розділу 4	59
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	60
5.1 Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів	60
5.1.1 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату	60
5.1.2 Повітря робочої зони	62
5.1.3 Аналіз наявності шуму	63
5.1.4 Вібрації	64
5.1.5 Електробезпека	64
5.1.6 Виробниче випромінювання.....	66
5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	66
5.2.1 Вимоги до організації робочого місця.....	66
5.2.2 Вентиляція	67
5.2.3 Аналіз освітленості приміщення	67
5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	68
5.3.1 Пожежна безпека	68
5.3.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	70
5.4 Висновки до розділу 5	70
ВИСНОВКИ	71
CONCLUSIONS.....	72

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	73
-----------------------	----

ВСТУП

Плівки FePt з магнітно-твердою упорядкованою фазою $L1_0$ FePt завдяки її великій енергії магнітокристалічної анізотропії ($\sim 7 \cdot 10^6$ Дж/м³), що забезпечує високу стабільність при термічних обробках, є перспективним матеріалом для створення магнітних носіїв інформації з надвисокою щільністю магнітного запису і високою надійністю зберігання інформації. Під час осадження на не нагріту підкладку у плівках FePt формується неупорядкована магнітно - м'яка фаза $A1$, в структурі якої атоми Fe та Pt хаотично розташовані у вузлах кристалічної ґратки. Для отримання упорядкованої структури $L1_0$ потрібний відпал, внаслідок чого починаються дифузійні процеси і відбувається процес упорядкування атомів Fe та Pt. Формування фази $L1_0$ FePt може супроводжуватися значним ростом зерен та поверхневої шорсткості, що небажано для середовища запису з надвисокою щільністю.

Для зменшення температури фазового перетворення $A1 \rightarrow L1_0$ FePt ефективно використання багат шарових структур. Розташування додаткового шару легуючого елемента змінює напружений стан у шарі FePt і, як наслідок, температуру впорядкування. При цьому, термічні напруження, які виникають за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення плівки FePt та підкладки, або легуючого елемента, під час відпалу значно впливають на процеси упорядкування.

Метою даної роботи було дослідження впливу розташування додаткового шару Ag (верхній, проміжний або нижній) товщиною 7,5 нм в нанорозмірних плівкових композиціях FePt-Ag на процеси дифузійного фазоутворення - перехід магнітно-м'якої фази $A1$ в магнітно-тверду фазу $L1_0$ FePt і зміну магнітних властивостей при відпалі у вакуумі в температурному інтервалі (300 – 900) °C.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Історія розвитку запису на жорсткі диски

Поверхнева щільність запису першого магнітного носія інформації на жорсткому диску "Ramack-305" (рис.1.1), розробленого в 1956 році на фірмі IBM, становила близько 2000 біт/дюйм² [1]. Пристрій мав ємність 5 Мбайт, а дані записувалися на 50 дисків діаметром 24 дюйми, що оберталися зі швидкістю 1200 об./хв. Середній час доступу дорівнював одній секунді, а щільність запису складала 2 Кбіт/дюйм² [2]. Розміри пристрою були порівняні з розміром двох домашніх холодильників, а його вартість становила 50 тис. дол. [3].



Рисунок 1.1 – Перший жорсткий диск IBM-350 [4]

Щільність запису неперервно зростала і на сьогоднішній день складає до 260 Гбіт/дюйм². Іншими словами, щільність запису збільшилась в 50 мільйонів раз [4,5].

На сьогоднішній день на один біт інформації відводяться досить значні площі: Ширина магнітної «доріжки» середовища стандартного жорсткого диску

(сплавів CoPtCrB) складає порядку 0,5 мкм-1 мкм, довжина області, потрібної на один біт дорівнює 50 нм -70 нм, розмір магнітних часток порядку 15 нм [6,7]. Це спонукає до нових досліджень у цьому напрямку і пошуку нових матеріалів з меншими розмірами доменів та більшою магнітною стабільністю. Найперспективнішими в якості таких матеріалів на сьогоднішній день вважаються нанорозмірні плівкові композиції на основі Fe, Pt та Pd.

1.2 Технології магнітного запису

1.2.1 Повздовжний магнітний запис

Це перший метод, який був реалізований на перших жорстких дисках.

Будь-який магнітний матеріал складається з доменів – областей, всередині яких магнітні моменти всіх частинок спрямовані в одну сторону і розташовуються паралельно поверхні носія. Інформація записується на диск, покритий плівкою з магнітного матеріалу. В результаті кожен такий домен набуває певного магнітного моменту, який в початковому стані - незорієнтований. Якщо плівку помістити в зовнішнє магнітне поле, то магнітні моменти доменів будуть прагнути зорієнтуватися в напрямку, що збігається з напрямком поля [8]. Цей ефект і використовується під час магнітного запису даних полем головки, що змінюється відповідно зі сигналом інформації (рис.1.2).

Біт інформації записується на області, що складається з 70 – 100 зерен. Якщо напрямок сумарного магнітного моменту такої частинки збігається з напрямком руху магнітної головки, то такий її стан можна зіставити логічному «0» даних, якщо напрями протилежні – логічній «1» [2].

Однак при використанні технології повздовжного магнітного запису виникають сили магнітної взаємодії сусідніх доменів, які мають протилежний напрямок магнітних моментів. В цьому випадку домени, розташовані на границях між ними, будуть відштовхуватися один від одного і зрештою змінять напрямки своїх магнітних моментів. Це може негативно відобразитися на інформації, яка була записана на цих доменах.

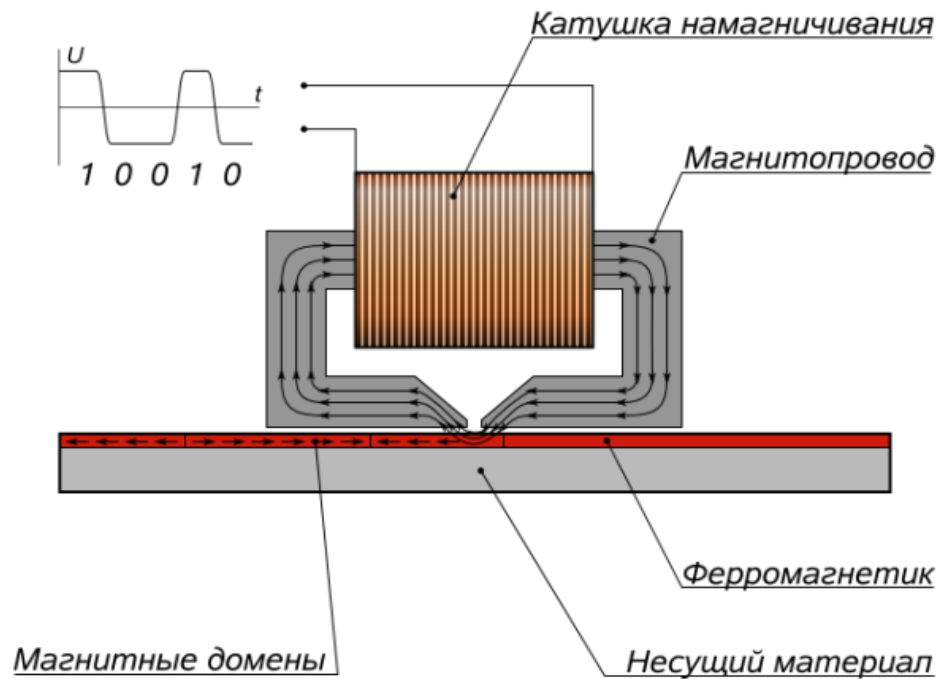


Рисунок 1.2 – Схема технології повздовжнього магнітного запису [2]

Однією з головних проблем технології повздовжнього магнітного запису є явище переходу зерна у суперпарамагнітний стан. Воно виникає, коли ми намагаємося зменшити розміри зерен, для збільшення щільності магнітного запису, тоді зерно може ставати термічно нестабільним.

Щоб запобігти взаємодії доменів, між ними створюють магнітно ізольовану зону. Завдяки цьому ми збільшуємо надійність збереження наших даних, але зменшуємо об'єми інформації, яку ми можемо записати.

1.2.2 Перпендикулярний магнітний запис

Через присутність явища суперпарамагнетизму при паралельному магнітному записі, вчені шукали інші, більш кращі, в розумінні щільності запису, методи запису. Це призвело до створення методу перпендикулярного магнітного запису. За допомогою цього методу щільність запису може досягати 230 Гбіт/дюйм^2 , що майже в двічі більше ніж у минулого методу [9].

Перпендикулярний магнітний запис відрізняється від паралельного тим, що сигнал в зчитувальній магнітній голівці формується тільки тоді, коли детектор перетинає силові лінії магнітного поля домена, тобто в тому місці, де ці

силові лінії перпендикулярні поверхні носія. У домена, що розташований паралельно площині диску, силові лінії магнітного поля перпендикулярні поверхні тільки на границях доменів. Коли голівка переміщується паралельно домену і, як наслідок, паралельно його силовим лініям сигнал в ній відсутній.

При перпендикулярному записі на диск, магнітні частинки розташовуються під прямим кутом до площини магнітного диска, то і силові лінії їх магнітних полів завжди будуть перпендикулярні поверхні, що більш раціонально для магнітного запису. Завдяки тому, що намагнічені частинки повернені один до одного різними полюсами, домени, що зберігають різні логічні значення, не взаємодіють. Таким чином, і не буде проявлятися явище суперпарамагнетизму і зникає необхідності ставити буферні зони, а отже можна досягати більших щільностей збереження даних [10].

Для перпендикулярного запису використовується голівка іншої конструкції, що створює поле між полюсом голівки запису і магнітно-м'яким підшаром на диску (рис. 1.3). Тому частинки шару запису намагнічуються вертикально, а частки магнітного підшару – горизонтально. Завдяки цьому забезпечується додаткова стабільність між частинками.

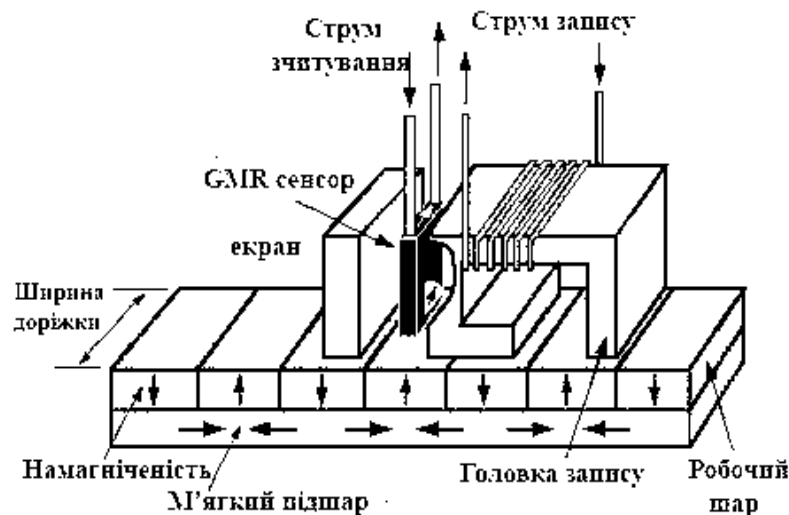


Рисунок 1.3 – Схема реалізації перпендикулярного магнітного запису [11]

Прогнозують, що сучасний спосіб перпендикулярного досягає межі щільності в 500 Гбіт/см². Таким чином, використання даного типу запису дозволить збільшити ємність 3,5-дюймових дисків до декількох терабайт [12].

1.2.3 Термічно активований магнітний запис

Одним з перспективних методів запису є також термічно активований магнітний запис (ТАМЗ) (рис.1.4). Принцип ТАМЗ виник з необхідності записувати інформацію на полікристалічних плівках матеріалів з дуже високою константою магнітокристалічної анізотропії ($L1_0$ FePt, CoPt), для яких не вистачає сили магнітного поля у записуючих головах, що зазвичай використовують для перпендикулярного запису.

Він полягає в тому, що під час запису необхідну ділянку потенційного носія інформації короткочасно нагрівають до температури Кюрі. Коерцитивна сила при цьому падає до нуля, після чого ділянка охолоджується і поступово досягає колишнього значення. В результаті магнітні домени стають більш рухомими, відбувається запис, і після швидкого охолодження повертається магнітно-твердий стан. Завдяки такому способу запису стає можливим запис на домени меншого розміру, тим самим підвищуючи щільність запису.

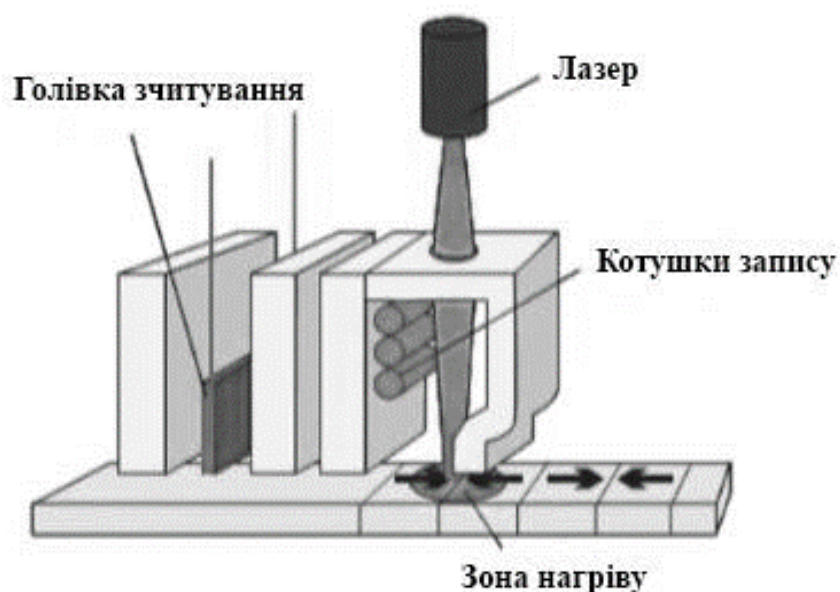


Рисунок 1.4 – Схема термічно активованого магнітного запису [14]

Дана технологія дозволяє збільшити щільність запису в порівнянні з перпендикулярним записом приблизно в 10 разів, тобто її перспективи оцінюються в декілька терабіт на квадратний дюйм, що в декілька разів більше, ніж у існуючих аналогів.

1.3 Перспективи використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt в якості середовища магнітного запису

На сьогоднішній день одними з найбільш перспективними матеріалами для майбутнього застосування у сфері надщільного магнітного запису вважаються нанорозмірні плівкові композиції на основі FePt з впорядкованою фазою $L1_0$ -FePt, яка має гранецентровану тетрагональну ґратку. Для фази $L1_0$ -FePt характерні коерцитивна сила, що перевищує 1600 кА/м, енергія магнітокристалічної анізотропії – 7 МДж/м³, а максимально можлива щільність магнітного запису на такий матеріал – 1 Тбіт/см², при досягненні розміру зерен менших за 3 нм, залишаючись при цьому термічно стабільною [15].

Однак, після осадження даних плівок в їх структурі формується неупорядкована фази $A1$ -FePt, для упорядкування якої необхідне проведення високотемпературного відпалу. Проте, це призведе до зменшення щільності запису даних через ріст зерен і ускладнює практичне використання даних матеріалів [19, 20, 21]. Для покращення результатів в цьому напрямку, необхідно знижувати температуру фазового перетворення $A1 \rightarrow L1_0$.

Крім зменшення температури фазового перетворення для майбутнього промислового використання магнітних носіїв на основі сплаву FePt необхідне вирішення і інших матеріалознавчих задач – формування в плівковому матеріалі вираженої текстури зерен в напрямку $[001]$ з віссю легкого намагнічування c в напрямку перпендикулярному до підкладки і високих значень коерцитивної сили.

Припускається, що за допомогою введення в нанорозмірні плівкові композиції проміжних «третьох» елементів (Ag, Cu, Au) можна досягти зменшення температури формування впорядкованої фази.

1.4 Висновок до розділу 1

Використання нанорозмірних плівкових композицій PtFe-Ag є актуальним і на сьогоднішній день, але літературні дані, щодо впливу проміжних шарів Ag на структуру та фазовий склад плівкових композицій на основі FePt, отриманих осадженням на підкладинки і підданих термічній обробці є неповними, і не рідко суперечать один одному через важкість дослідження наноматеріалів і необхідність врахування великої кількості параметрів, що впливають на їх структуру, а отже і на магнітні та експлуатаційні характеристики.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали дослідження

В роботі досліджується формування впорядкованої магнітно-твердої фази L_{10} -FePt в нанорозмірних плівкових композиціях Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) та Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм). Відпал зразків проводився у високому вакуумі $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 300 °С–900 °С з витримкою 30 с при кожній температурі зі швидкістю нагріву – 5 °С/с. Шари металів Fe, Pt та Ag послідовно осаджували магнетронним методом на підкладку SiO₂(100 нм)/Si(001).

2.1.1 Магнетронний метод одержання плівкових матеріалів

Досліджувані НПК були отримані магнетронним методом осадження з використанням мішеней з сплава Fe-Pt та Ag високої чистоти (99,99 %) у пристрої В55.

При зіткненні іонів високої кінетичної енергії з поверхнею твердого тіла відбувається енергетичний перенос, який може призвести до розділення атомів, молекул чи кластерів. Це знаходить технічне застосування як розпилення вказаного переходу при контрольованому виготовленні шарів в нанорозмірній області. Принципову будову магнетронного розпорошуючого джерела представлено на рисунку 2.1.

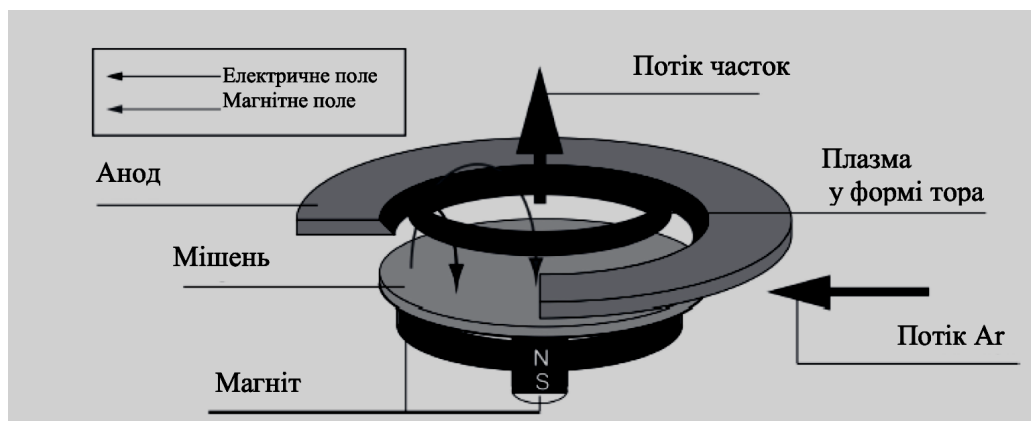


Рисунок 2.1 – Будова магнетронного розпорошуючого джерела [16]

Розпорошення протікає у вакуумі для того, щоб забезпечувати достатньо високу довжину вільного пробігу для руху часток. Утворення іонів відбувається при контрольованому введенні робочого газу (наприклад, Ar, Xe, O₂). В основному в газі постійно іонізується невелика частина атомів. При прикладеному електричному полі між анодом і мішенню (катодом) позитивно заряджені іони рухаються в напрямку мішені, а наявні електрони до аноду. Цей рух викликає іонізацію при зіткненні і веде до утворення плазми.

Основними елементами магнетрона є катод - мішень, анод і магнітна система (рис. 2.2). Силкові лінії магнітного поля замикаються між полюсами магнітної системи. Поверхня мішені, розташована між системами входу і виходу силових ліній магнітного поля, інтенсивно розпорошується і має вид замкнутої доріжки, геометрія якої визначається формою полюсів магнітної системи. При подачі постійної напруги між мішенню (негативний потенціал) і анодом (позитивний потенціал) виникає неоднорідне електричне поле і збуджується тліючий розряд. Наявність замкнутого магнітного поля до поверхні мішені, що розпорошується, дозволяє локалізувати плазму розряду безпосередньо в мішені. Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони захоплюються магнітним полем, і їм надається складний рух по замкнутих траєкторіях біля поверхні мішені.

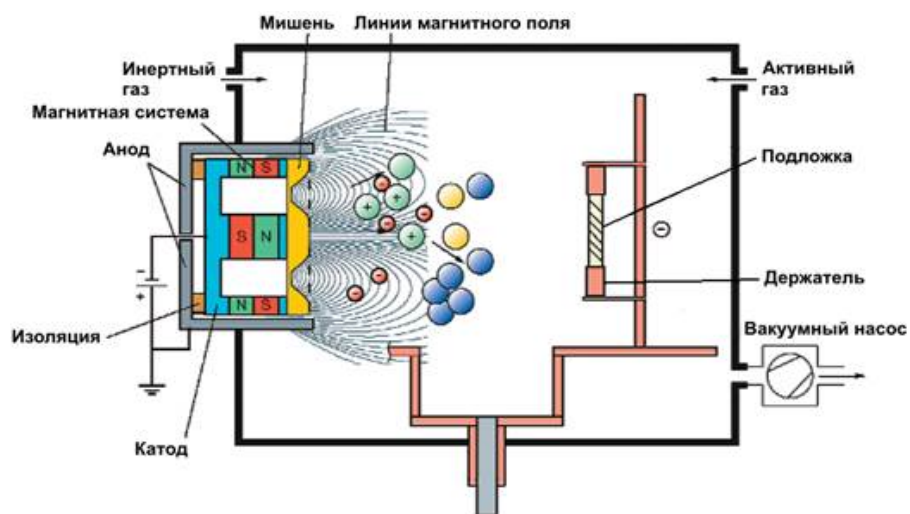


Рисунок 2.2 – Схема методу магнетронного напilenня [24]

Електрони виявляються у пастці, яка створюється з однієї сторони магнітним полем, що повертає їх на катод, а з іншого боку - поверхнею мішені, що їх відштовхує. Електрон циркулює в цій пастці доти, поки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, у результаті яких він втратить отриману від електричного поля енергію. Таким чином, велика частина енергії електрона, перш ніж він попадає на анод, використовується на іонізацію і збудження, що значно збільшує ефективність процесу іонізації і приводить до зростання концентрації позитивних іонів близько поверхні мішені. Це, у свою чергу, призводить до збільшення інтенсивності іонного бомбардування мішені і значний ріст швидкості осадження плівки. Тиск у камері 1,33 Па [17].

В представленому джерелі розпилення плазма, яка утворюється у вигляді тору, просторово обмежена і не має прямого контакту з мішенню. Поле показує радіальну симетрію. Іони досягають мішені і вибивають матеріал. Вибиті (вільні) атоми, молекули чи кластери не мають заряду і віддаляються від мішені прямолінійно перед тим, як осядуть на поверхню підкладки чи стінки вакуумної камери. Просторовий розподіл руху часток негетерогенний і має форму аналогічна «пелюстці». Все ж можна досягти гомогенного (однорідного) осадження шару, оскільки, тримач підкладки обертається і розміщується трохи під кутом до джерела, що розпилюється.

2.1.2 Термічна обробка

Відпал зразків проводився у високому вакуумі $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 300 °C–900 °C з витримкою 30 с при кожній температурі зі швидкістю нагріву – 5 °C/с.

2.2 Методика дослідження

Дослідження плівкових композицій Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) та Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) після осадження при кімнатній температурі та

відпалу у вакуумі проводили за допомогою методу рентгеноструктурного фазового аналізу, атомно-силової мікроскопії та SQUID магнітометрії.

2.2.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгенографічні дослідження фазового складу та кристалічної структури зразків виконувались на пристрої ULTIMA IV (Rigaku). Зйомку проводили у випромінєнні мідного аноду Cu K_α ($\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$), прискорювальна напруга – 40 кВ та анодний струм – 40 мА.

Особливістю дослідження тонких плівок є те, що рентгенографічно можна не помітити фазу, вміст якої у відсотковому співвідношенні у плівці може бути високим, але у зв'язку з малою товщиною плівки малий за абсолютним значенням.

Оскільки глибина проникнення рентгенівських променів більша товщини досліджуваного об'єкта, то на рентгенограмі можуть фіксуватись рефлекси від підкладки (у випадку якщо вона не знаходиться у аморфному стані як, наприклад, оксид кремнію). Наявність цих ліній затрудняє ідентифікацію і може бути причиною неоднозначності висновків щодо фазового складу плівок [18].

Кожна фаза має свою кристалічну комірку. Родини атомних площин, що утворюють цю ґратку, мають свій характерний тільки для даної ґратки комплекс значень міжплощинних відстаней d_{hkl} . Визначення фазового складу полікристалічних речовин по їх міжплощинним відстаням є однією з найбільш поширених та порівняно легко вирішуваних завдань рентгенівського аналізу [19].

Для того, щоб хвилі, розсіяні сімейством рівнобіжних площин кристала дали максимум інтенсивності необхідно виконання наступного співвідношення між міжплощинною відстанню d , кутом падіння рентгенівських хвиль на дану кристалографічну площину і довжиною хвилі рентгенівського випромінювання λ :

$$2d \sin\theta = n \lambda, \quad (2.1)$$

де d - міжплощинна відстань, властива даній фазі, \AA ;

θ - брегівський кут;

λ - довжина хвилі випромінювання, Å ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,54178$ Å);

n - порядок відображення, ($n=1$).

Ця рівність (2.1) виражає основний закон дифракції рентгенівських променів у кристалах і називається умовою Вульфа-Брегга [28].

Ця умова має просту фізичну інтерпретацію: рентгенівські хвилі, розсіяні сусідніми атомними площинами кристала будуть при інтерференції підсилюватися в тому випадку, коли різниця ходу між ними дорівнює цілому числу довжин хвиль λ .

Так як λ для даного випромінювання відома, то задача визначення міжплощинних відстаней і параметра кристалічної ґратки зводиться до знаходження кутів θ для всіх рефлексів рентгенограми. Ідентифікація фаз проводилась за картотекою ASTM та з використанням програми CaRine 3.0 шляхом порівняння кутового положення (міжплощинних відстаней) та інтенсивності рефлексів [20].

Для визначення ступеня впорядкування фази $L1_0(\text{FePt})$ були використані співвідношення c/a , де c і a – параметри ґратки фази $L1_0(\text{FePt})$, відношення інтенсивностей дифракційних максимумів $I(001)/I(002)$, $I(001)/I(111)$.

Параметри ґратки гранецентрованої тетрагональної ґратки розраховувались за формулою:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.2)$$

Ступінь хімічного упорядкування фази $L1_0(\text{FePt})$ також може бути оцінено обчисленням параметра хімічного упорядкування дальнього порядку S^* , використовуючи рівняння (2.3):

$$S^* = 0.85 \left[\frac{I_{001}}{I_{002}} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Ступінь орієнтації вісі легкого намагнічування $[001]$ по відношенню до нормалі до поверхні плівки визначалася по відношенню $I(001)/I(111)$, ступінь

магнітного упорядкування – по відношенню $I(001)/I(002)$ (де I – інтенсивність структурного рефлексу).

Середні розміри зерен фази FePt та легуючих елементів проміжних шарів Ag були оцінені з уширень рефлексів на дифрактограмі за формулою Дебая-Шерера [21]:

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2.4)$$

де d – середній розмір кристалітів, λ – довжина хвилі випромінення, що використовується Å;

β - ширина піка на половині висоти, θ – кут дифракції;

$k = 0,9$.

2.2.2 Атомно-силова мікроскопія

Поверхневу шорсткість плівкових композицій досліджено на атомно-силовому мікроскопі Digital Instruments Dimension 3000 (рис. 2.3).

Атомний силовий мікроскоп – високотехнологічний науковий прилад, що дозволяє отримувати зображення поверхні зразків із роздільною здатністю порядку кількох нанометрів та маніпулювати наноскопічними об'єктами, наприклад, окремими молекулами.

В атомному силовому мікроскопі поверхню сканує тонкий щуп, розташований на кінці консольної балки, яку називають кантилевером. Високоточне переміщення поверхні під щупом забезпечують п'єзoeлектричні елементи, які змінюють свою довжину в залежності від прикладеної напруги. Рухаючись над нерівною поверхнею, щуп підіймається і опускається, і ці дуже малі вертикальні переміщення відображаються за допомогою лазерного променя, який падає на верхню поверхню консольної балки з прикріпленою до нього дзеркальною поверхнею[22]. Хоча вертикальні переміщення дзеркала дуже малі, відбитий від нього промінь відхиляється на кут, досить значний, щоб його можна було виміряти за допомогою матричного фотодетектора. Отриманий сигнал аналізується за допомогою електроніки й перетворюється в зображення поверхні.

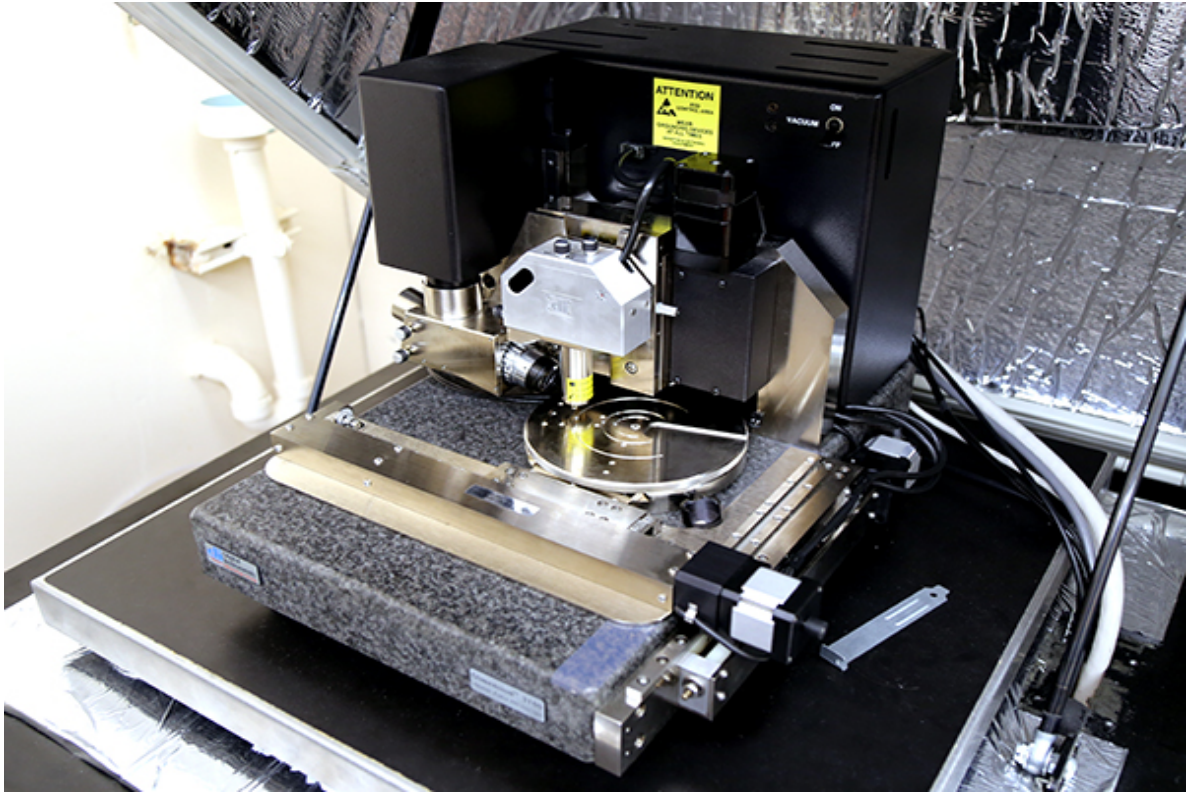


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд атомно-силового мікроскопу Digital Instruments Dimension 3000 [23]

Для забезпечення постійної сили між поверхнею та щупом і запобігання пошкоджень, використовується електронний механізм зворотного зв'язку. Зразок при скануванні переміщується за допомогою прецизійних п'єзодвигунів, які регулюються комп'ютером. По завершенню сканування двомірне (тривимірне) зображення морфології поверхні зразка виводиться на екран комп'ютера.

Режими роботи атомно-силового мікроскопу класифікуються за потенціалом взаємодії зонду з поверхнею на різних відстанях поміж зразком та кантілевером. Вид кривої потенціалу взаємодії зонду зі зразком зображено на рисунку 2.4.

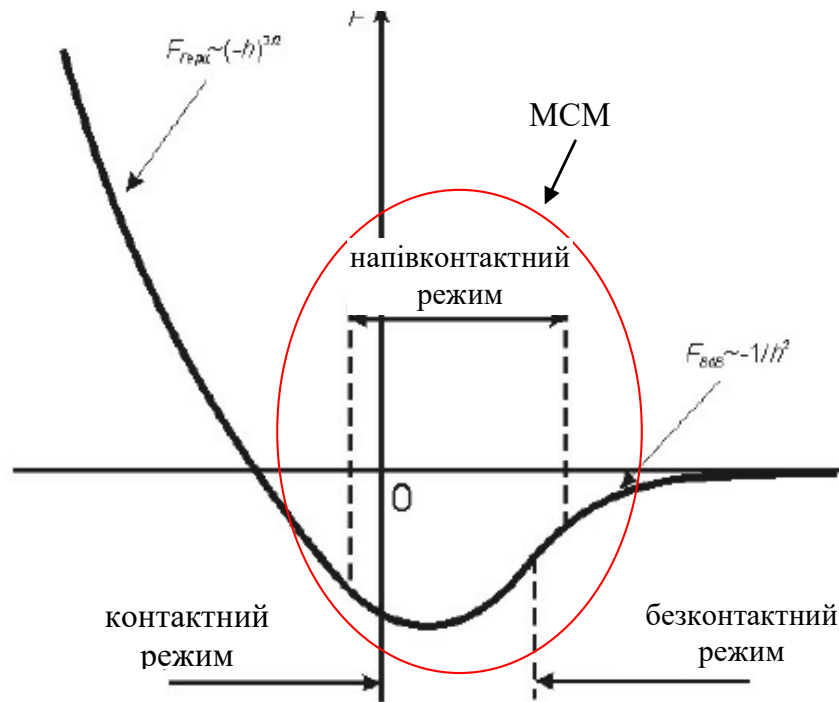


Рисунок 2.4 - Потенціал взаємодії зонду зі зразком

Існує три основних режими роботи атомно-силового мікроскопу: контактний, безконтактний та вібраційний.

Найбільш високу роздільну здатність забезпечує контактний метод, при якому голка торкається поверхні зразка під час його сканування. В безконтактному режимі вістря голки коливається над поверхнею зразка з частотою 100 КГц – 1 МГц. Цей режим підвищує чутливість атомно-силового мікроскопу, в результаті чого можуть бути зафіксовані навіть ван-дер-ваальсові та електростатичні сили. Недоліком цього режиму роботи є виникаючий високий тиск, який може викликати пошкодження зразка і вістря голки.

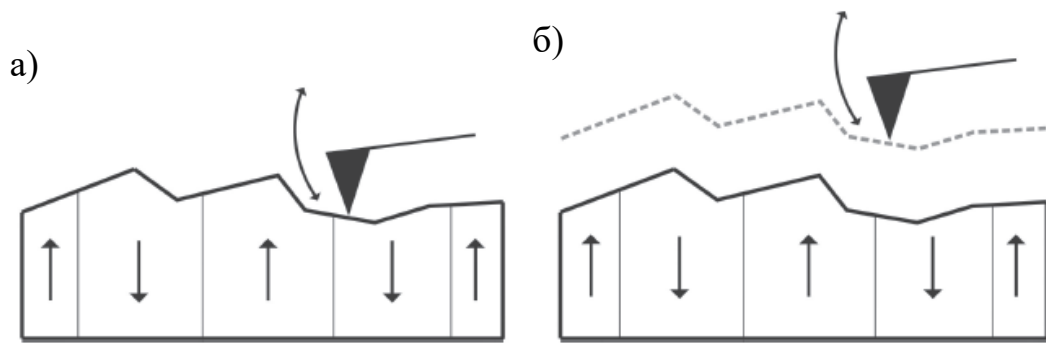
Вібраційний режим поєднує в собі елементи контактного та безконтактного режимів. В вібраційному режимі кантилевер коливається з більшою амплітудою і вістря голки дотикається до поверхні зразка на короткі проміжки часу, внаслідок чого роздільна здатність є такою ж, як при контактному режимі, а пошкодження зразка чи голки відсутні.

2.2.3 Магнітно-силова мікроскопія

Незабаром після атомно силової мікроскопії в 1986 році була винайдена магнітно-силова мікроскопія (МСМ). Вона заснована на тих же принципах, за винятком того, що кантілевер намагнічується, і рухається вздовж поверхні (використовуючи вже записані дані про її морфологію) відхиляючись від початкового положення під дією магнітної взаємодії між ним і зразком. Магнітні сили переважають на відстанях порядку тисячі ангстрем.

При використанні магнітних зондів, а саме у режимі магнітно-силової мікроскопії (МСМ) (рис.2.5), можна вивчати магнітні властивості поверхневих структур з субмікронною роздільною здатністю. За допомогою двопрхідної методики і «ліфтинг-режиму» роботи МС-мікроскопу можна отримувати одночасно і топографію ділянки поверхні зразка, що досліджується, і магнітний образ тієї ж ділянки. Суть «ліфтинг-режиму» полягає в тому, що зонд проходить над однією й тією ж ділянкою двічі: під час першого проходу відбувається дотикання з поверхнею, профіль якої запам'ятовується, а під час другого проходу зонд, піднявшись на задану висоту, рухається по запам'ятованій траєкторії, реагуючи тільки на магнітні взаємодії. Магнітний контраст, що отримується, буде відповідати карті сил магнітної взаємодії між поверхневими структурами і зондом для dc – режиму (кантілевер не коливається) режиму мікроскопу) або буде відображати розподіл градієнту сил магнітної взаємодії зонд-поверхня у випадку dc - режиму (кантілевер коливається на власній частоті).

Оскільки магнітні взаємодії дальньодіючі, вклад зонду мікроскопу стає більш суттєвим. Відповідно, необхідно аналізувати дані, що отримуються за допомогою МСМ, з урахуванням впливу зонду, що використовується. Причому, вплив зонду може бути як за рахунок форми кінчика самого зонда і магнітної частини його, так і за рахунок його магнітних властивостей, в тому числі через розподіл по об'єму його магнітної частини.



а - перше сканування, чутливе до топографії; б - друге сканування, з підтримкою постійної відстані між зондом і поверхнею і, відповідно, чутливе до магнітних полів

Рисунок 2.5 – Схематичне представлення «ліфтинг-режиму» на зразку з перпендикулярною магнітною анізотропією

Властивості МСМ-зонда в більшості визначають якість МСМ-зображень, а значить, і можливості самого методу.

Зонди для МСМ досліджень з високою роздільною здатністю були закуплені від *Team Nanotec GmbH* і радіус зонду після Со - покриття був меншим 40 нм, а повний кут конуса точно визначався біля 12° . Бокова магнітна роздільна здатність, яка залежить від відстані зонд-зразок, також як і властивостей власне зонду, була біля 20 нм.

Для видалення більш чисто магнітного сигналу, магнітні зображення були отримані з використанням «ліфтинг-режиму» (*Lift Mode*). Під час першого сканування зонд прилягає до поверхні і відображається топографія. Після цього зонд втягується і виконується друге сканування з підтримкою постійної відстані зонд-зразок від 20 нм до 30 нм, дотримуючись попередньо записаного профілю висот.

2.2.4 SQUID магнітометрія

Найбільш чутливим приладом для дослідження магнітних властивостей плівок є надпровідний квантовий інтерференційний пристрій (SQUID).

В даній роботі використовувався магнітометр MPMS SQUID VSM виробництва Quantum Desig, який має чутливість $8 \cdot 10^{-8}$ при максимальному прикладеному полі 5600 кА/м

Квантовий магнітометр в спрощеному вигляді – надпровідне кільце з двома джозефсонівськими тунельними контактами, який є аналогом оптичного ефекту з інтерференцією від двох щілин.

В SQUID хвиля електронів поділяється на дві, кожна з них проходить свій тунельний контакт, після цього обидві хвилі з'єднуються разом. У випадку відсутності зовнішнього поля ці дві хвилі будуть еквівалентними, і пройдуть без різниці фаз. Але при наявності магнітного поля в контурі з'являється різниця фаз і при з'єднанні хвиль електронів спостерігається явище інтерференції.

2.3 Висновки до розділу 2

В даній роботі використано широкий спектр методів сучасного фізичного матеріалознавства: метод магнетронного осадження плівкових композицій, швидкісний термічний відпал в атмосфері азоту, метод рентгеноструктурного фазового аналізу, атомно-силову мікроскопію та SQUID-магнітометрію. Дані методики дозволяють отримати інформацію про якісні та кількісні характеристики структури, складу та магнітних властивостей плівкових композицій.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Рентгеноструктурний аналіз

Після осадження та відпалів в інтервалі температур (600-900) °C на дифрактограмах плівкових композицій Ag(7,5 нм)/ Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/ Ag(7,5 нм) присутні рефлекси (111) від неупорядкованої фази A1 FePt та срібла (рис. 3.1, рис. 3.2).

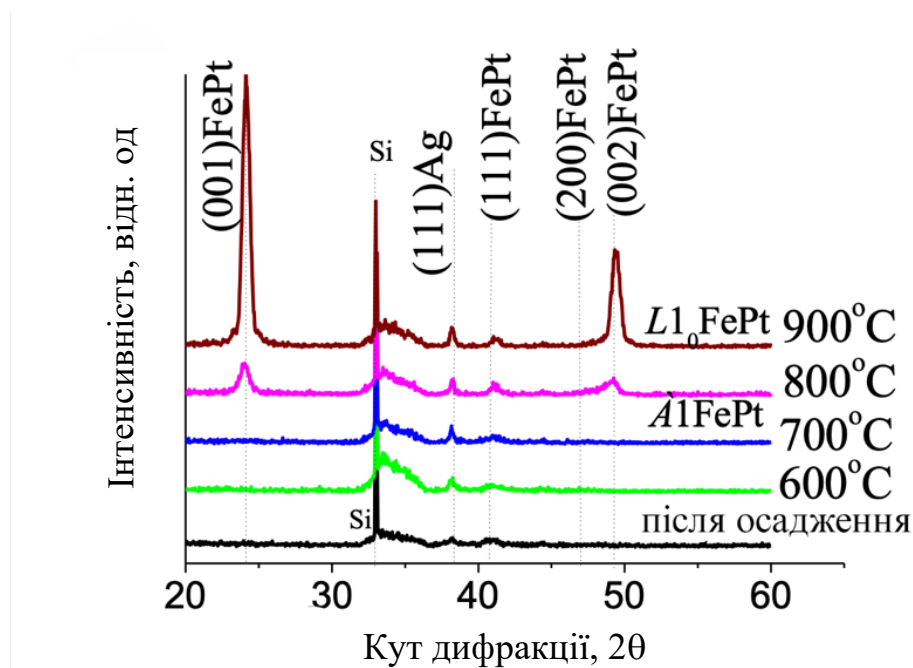


Рисунок 3.1 - Спектри рентгенівської дифракції плівок Ag(7,5 нм)/ Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), випромінення Cu K α

Відпали у вакуумі в інтервалі температур 300 °C – 600 °C не супроводжуються помітною зміною структурно-фазового складу (рис.3.1, рис.3.2). Після відпалу за температури 700 °C у плівках з верхнім та нижнім шарами срібла відбувається зміщення рефлексу (111) FePt у бік більших кутів, що пов'язано з процесами впорядкування і появою тетрагональних спотворень

ґратки.

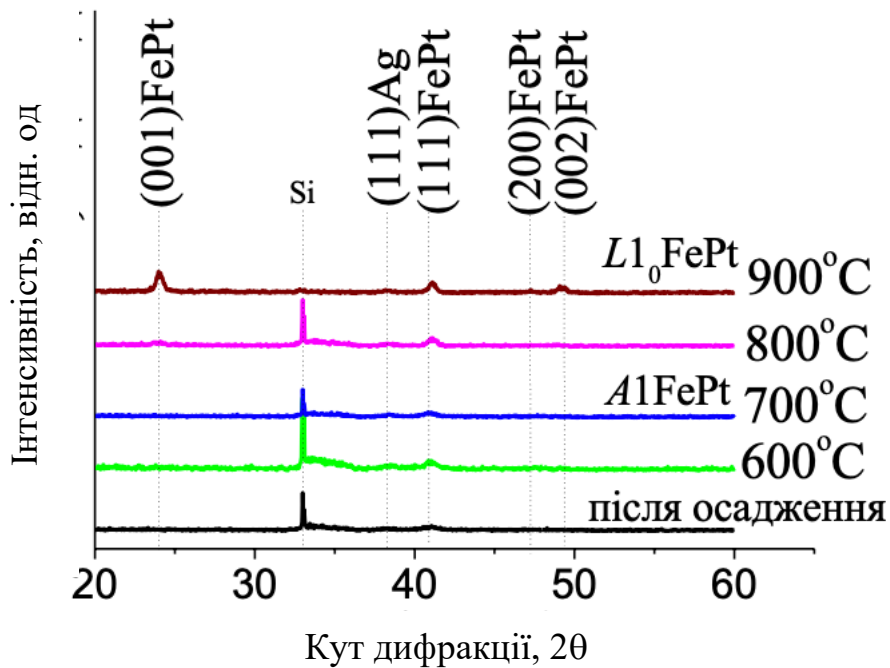


Рисунок 3.2 - Спектри рентгенівської дифракції плівок

$\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$, випромінення $\text{Cu } K_{\alpha}$

В той же час у плівці з проміжним шаром срібла $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ починає формуватись впорядкована фаза $L1_0 \text{ FePt}$, про що свідчить поява надструктурного рефлексу (001) FePt (рис. 3.3). У плівках $\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ та $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ надструктурний рефлекс (001) низької інтенсивності з'являється після відпалу за температури 800 °C (рис. 3.1, рис. 3.2).

Після осадження на дифрактограмах плівкових композицій $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ присутні рефлекси (111) від неупорядкованої фази $A1 \text{ FePt}$ та срібла (рис. 3.3).

Поява надструктурного рефлексу (001) FePt свідчить про початок формування впорядкованої фази $L1_0 \text{ FePt}$.

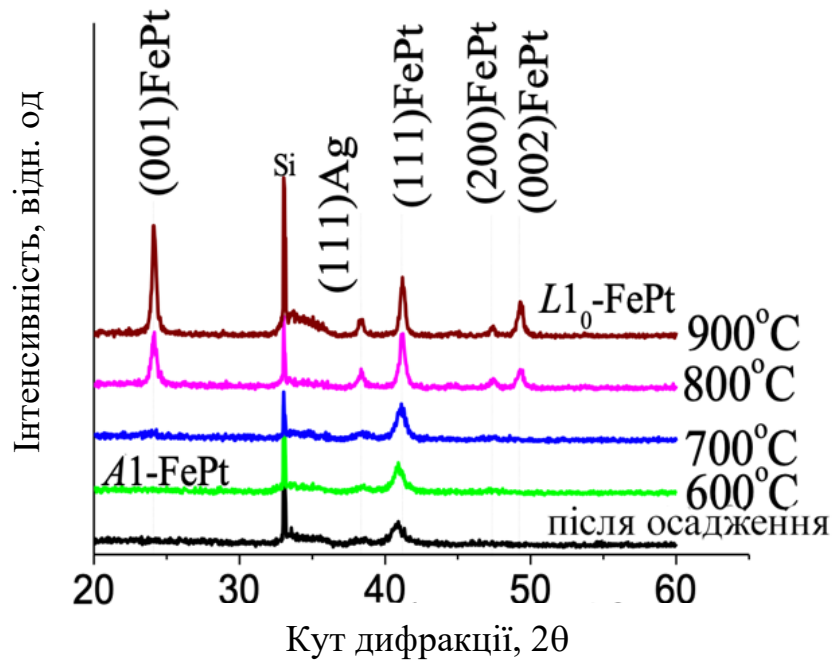


Рисунок 3.3 - Спектри рентгенівської дифракції плівок $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$, випромінення $\text{Cu } K_{\alpha}$

Значення напруженого стану у осаджених плівках впливає на процеси формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt. Більший рівень стискаючих напружень (-7,8 ГПа) в плівці з проміжним шаром срібла $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$, ніж у плівках з верхнім $\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ (-3,6 ГПа) та нижнім $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ (0,86 ГПа) сприяє фазовому перетворенню $A1 \rightarrow L1_0$ та зменшенню на 100 °C температури формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt, яка має менший об'єм ґратки (рис. 3.4).

Збільшення значень залишкових напружень можна пояснити дифузійними процесами срібла, яке намагається дифундувати в верхні шари, тим самим створюючи додаткові напруження.

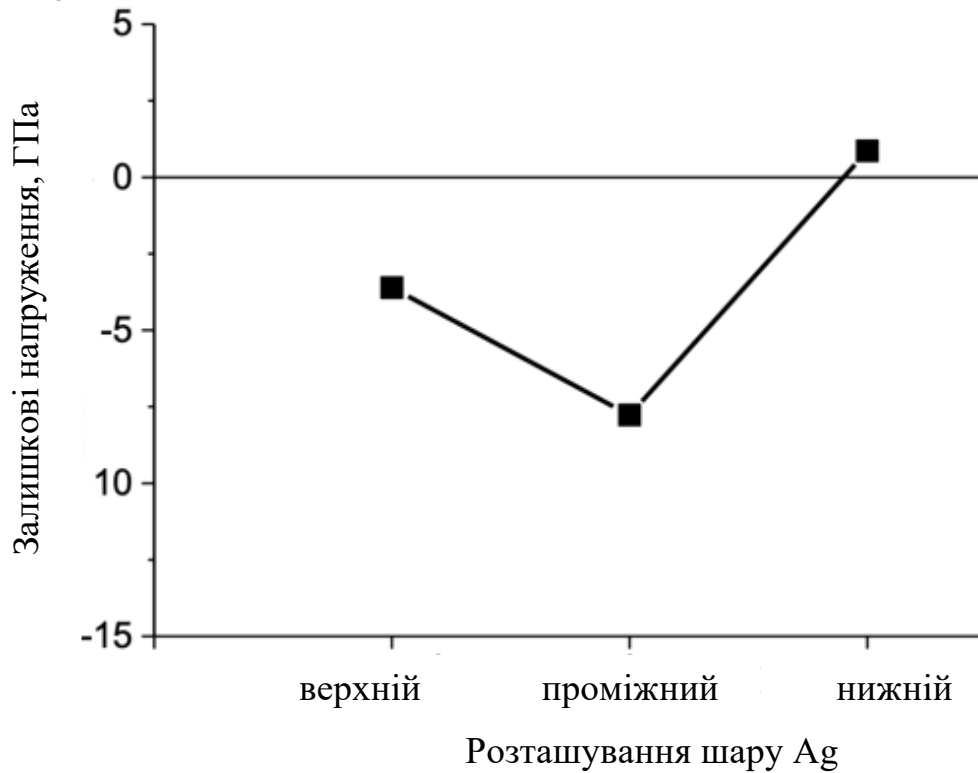


Рисунок 3.4 - Зміна залишкових напружень в шарі FePt з розташуванням додаткового шару Ag у нанорозмірних плівках після осадження

Повна релаксація напружень відбувається в плівках з верхнім шаром срібла та без нього після відпалів за температур 700 °C та 800 °C, відповідно, коли починає формуватися впорядкована фаза $L1_0$ FePt. В плівці з верхнім та нижнім шарами срібла при формуванні впорядкованої фази $L1_0$ FePt за температури 800 °C наявні стискаючі напруження (рис. 3.5). Таку зміну напруженого стану можна пояснити дифузією срібла по границях зерен фази $L1_0$ FePt і більшим коефіцієнтом термічного розширення Ag порівняно з FePt.

Зі збільшенням температури відпалу до 600 °C за рахунок дифузійних процесів упорядкування рівень стискаючих напружень зменшується.

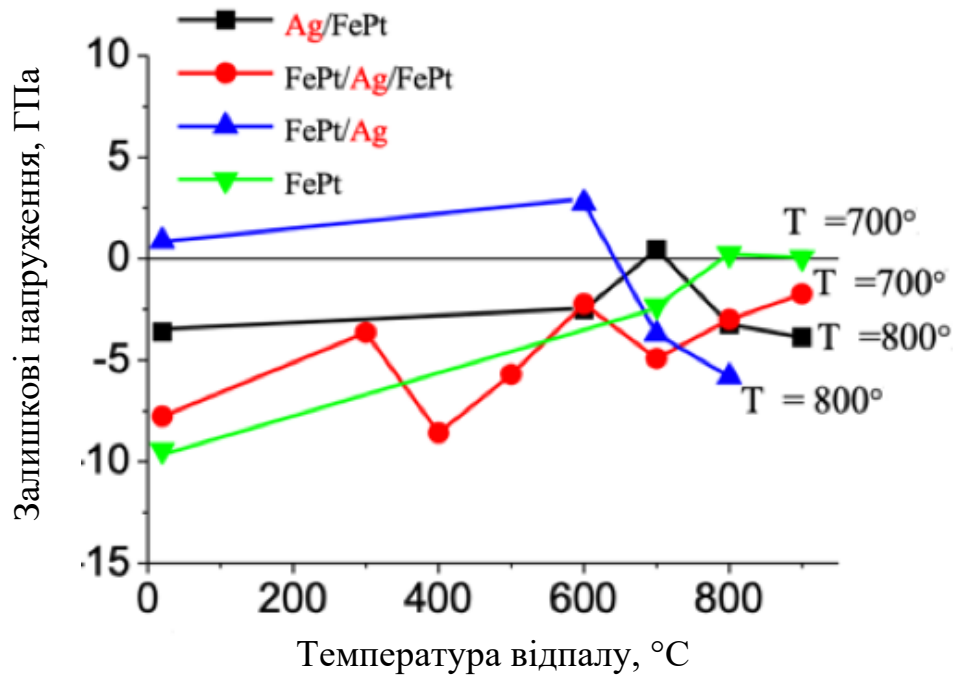


Рисунок 3.5 – Зміна залишкових напружень в шарі FePt з розташуванням додаткового шару Ag у нанорозмірних плівках з температурою відпалу у вакуумі

Зі збільшенням температури відпалу від 700 °C до 900 °C у плівці Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) відношення інтенсивностей надструктурного (001) і (002) рефлексів практично не змінюється.

В той же час відношення $I(001)/I(002)$ у плівках з різним розташуванням додаткового шару срібла збільшується, що підтверджує збільшення кількості упорядкованої фази та підвищення ступеня упорядкування (рис. 3.6).

Відношення інтенсивностей рефлексів $I(001)/I(111)$ фази $L1_0$ -FePt різко зростає з температурою відпалу для плівок з верхнім шаром срібла та без нього (рис. 3.7).

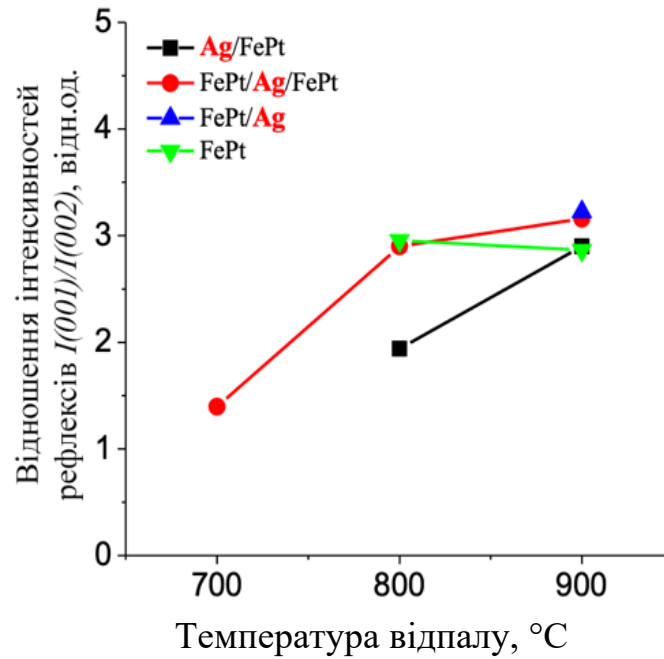


Рисунок 3.6 – Зміна відношень інтенсивностей структурних рефлексів $I(001)/I(002)$ фази $L1_0$ -FePt з температурою відпалу у вакуумі

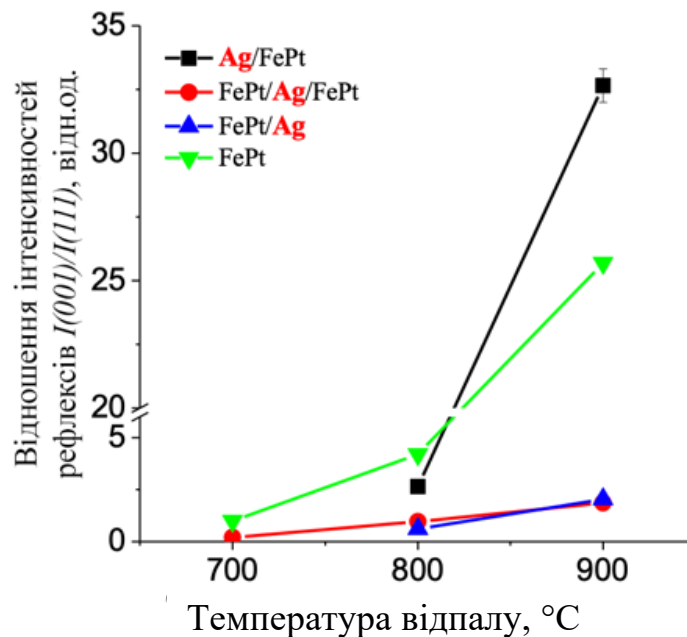


Рисунок 3.7 – Зміна відношень інтенсивностей структурних рефлексів та $I(001)/I(111)$ фази $L1_0$ -FePt з температурою відпалу у вакуумі

Це свідчить про збільшення кількості зерен фази $L1_0$ -FePt з орієнтацією вісі легкого намагнічування c в напрямку $[001]$ перпендикулярному до площини

плівки. Більш виражену текстуру (001) в плівці з верхнім шаром срібла можна пояснити меншим рівнем початкових стискаючих напружень.

Аналізуючи графік зміни параметрів ґратки a $L1_0$ -FePt (рис. 3.8) у плівкових композиціях з різним розташуванням срібла, ми можемо сказати, що підвищення температури відпалу вище за 700 °C у плівкових композиціях параметр ґратки a фази FePt збільшується, а параметр ґратки c зменшується (рис. 3.9).

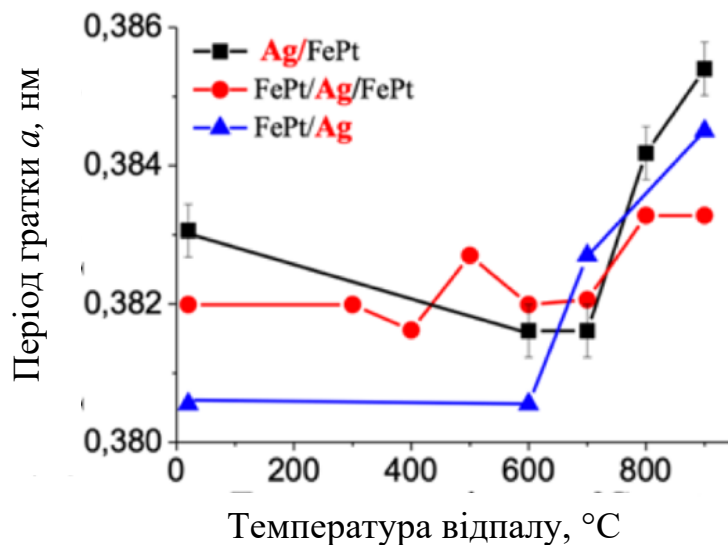


Рисунок 3.8 – Зміна параметрів ґратки a фази $L1_0$ -FePt у плівках з різним розташуванням додаткового шару Ag з температурою відпалу у вакуумі

Аналізуючи графік зміни параметрів ґратки c $L1_0$ -FePt (рис. 3.9) у плівкових композиціях з різним розташуванням срібла, ми можемо сказати, що в нанорозмірній плівковій композиції $Fe_{50}Pt_{50}(15\text{ нм})/Ag(7,5\text{ нм})$ параметр c змінюється в межах похибки.

Зменшення параметра c та відношення c/a зі збільшенням температури відпалу свідчить про збільшення ступеню упорядкування фази $L1_0$ -FePt (рис. 3.10).

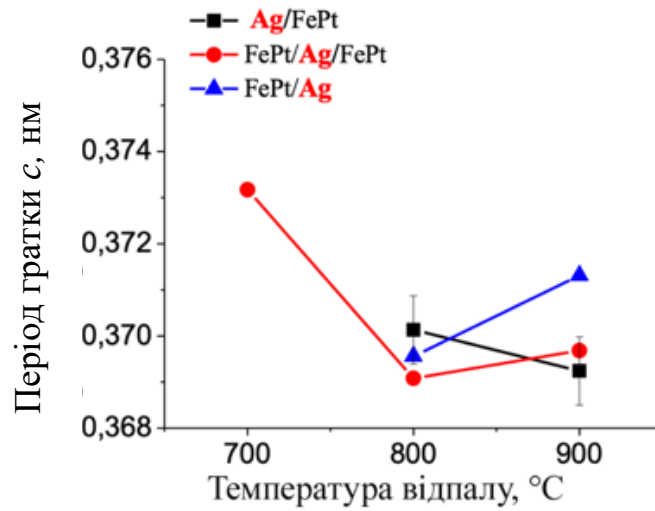


Рисунок 3.9 – Зміна параметрів ґратки c фази $L1_0$ -FePt у плівках з різним розташуванням додаткового шару Ag з температурою відпалу у вакуумі

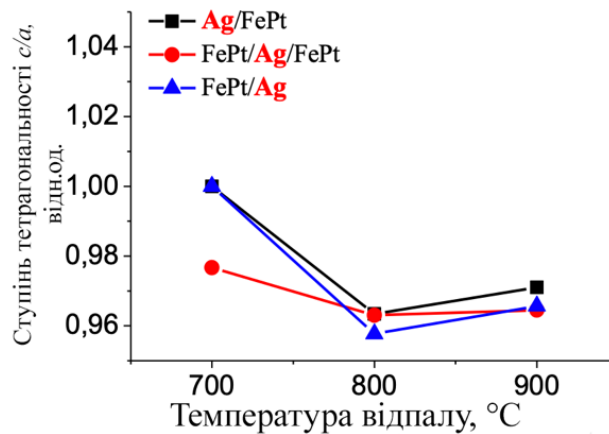


Рисунок 3.10 – Зміна відношення c/a у плівках з різним розташуванням додаткового шару Ag з температурою відпалу у вакуумі

3.2 Атомно-силова мікроскопія

Розмір зерен FePt незначно змінюється при відпалах в інтервалі температур (300 – 600) °C. Зі збільшенням температури відпалу вище 700 °C ми спостерігаємо інтенсивний процес росту зерен в нанорозмірних плівкових композиціях

Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм),
 Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм), Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/ Ag(7,5 нм) (рис.3.11).

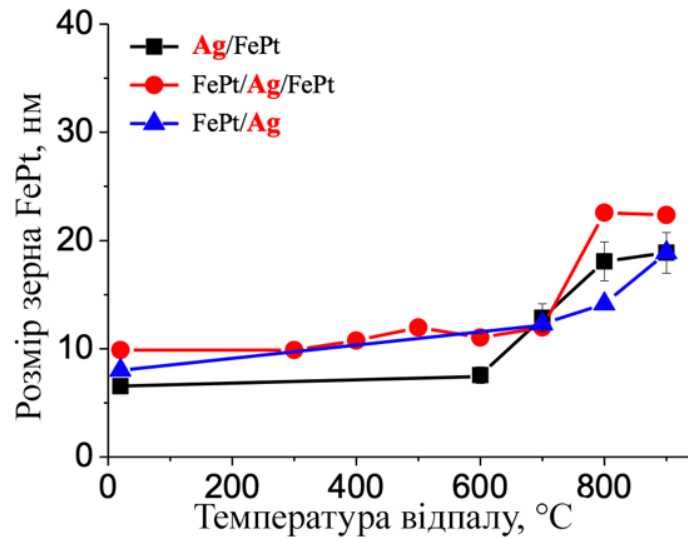


Рисунок 3.11 – Зміна розміру зерен фаз FePt у плівкових композиціях з різним розташуванням додаткового шару Ag з температурою відпалу у вакуумі

Розмір зерен Ag при збільшенні температури відпалу збільшується. Зі збільшенням температури відпалу до 700 °C зерно в усіх трьох нанорозмірних плівкових композиціях починає інтенсивно рости (рис. 3.12).

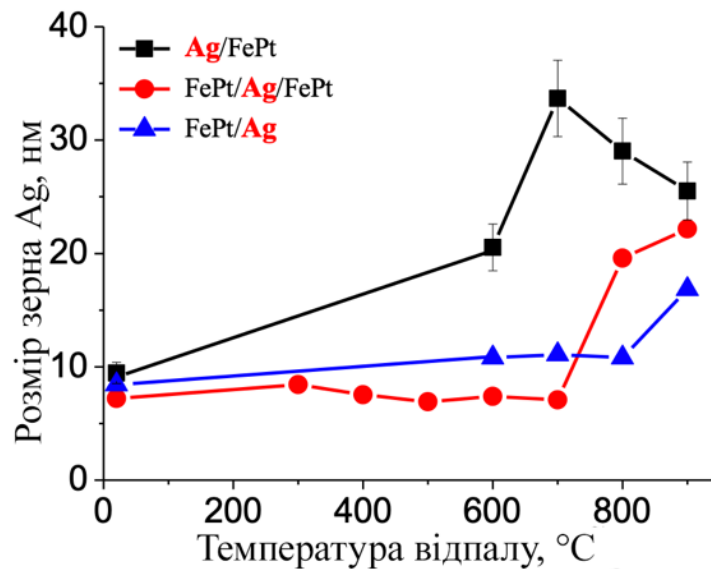


Рисунок 3.12 – Зміна розміру зерен Ag у плівкових композиціях з різним розташуванням додаткового шару Ag з температурою відпалу у вакуумі

Зображення морфології поверхні плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})/\text{Ag}(7,5\text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})$ після осадження та відпалів у вакуумі в інтервалі температур (300 – 900)°C представлено на рис. 3.13.

Після осадження поверхня плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})/\text{Ag}(7,5\text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})$ залишається гладкою, та її шорсткість майже не змінюється. При підвищенні температури відпалу від 700 °C до 900 °C середня шорсткість поверхні плівок збільшується від 0,11 нм до 0,25 нм, що корелює зі зростанням розміру зерен FePt та Ag.

При підвищенні температури відпалу середня шорсткість поверхні від 0,16 нм після осадження до 0,29 нм після відпалу за температури до 900 °C. (рис.3.14), що можна пояснити ростом зерен фази $L1_0$.

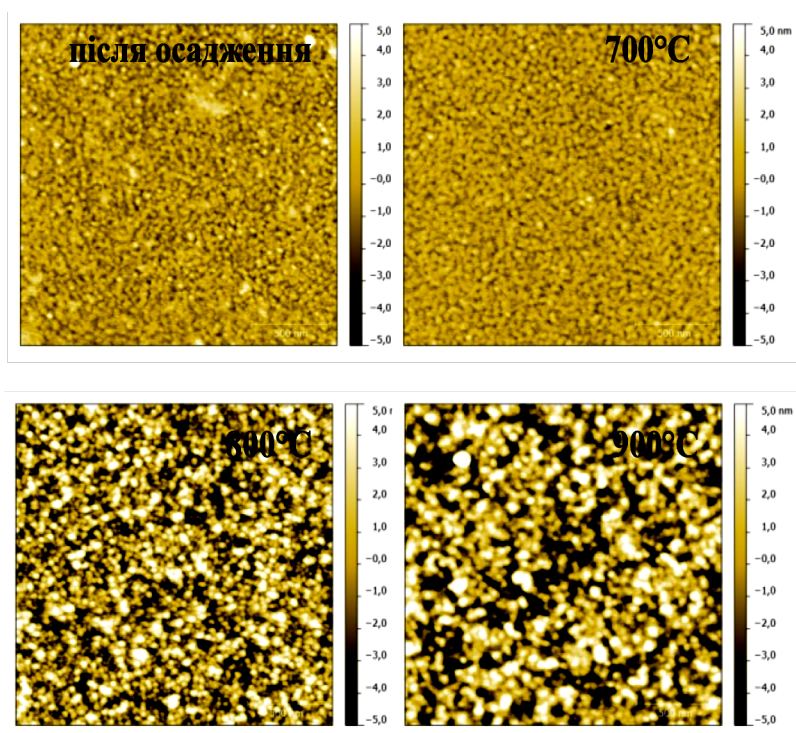


Рисунок 3.13 – Морфологія поверхні плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})/\text{Ag}(7,5\text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})$ після осадження та відпалів у вакуумі

У композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})/\text{Ag}(7,5\text{ нм})$ шорсткість поверхні починає зростати за температури відпалу 800 °C (рис. 3.15).

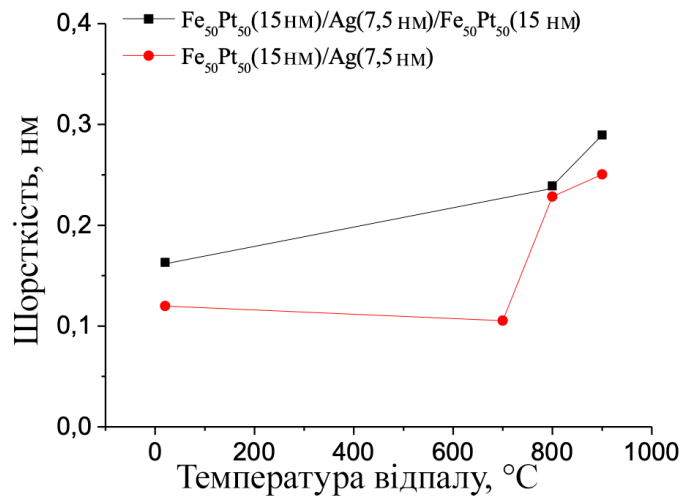


Рисунок 3.14 – Залежність середньої шорсткості поверхні плівок Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) та Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм) від температури відпалу

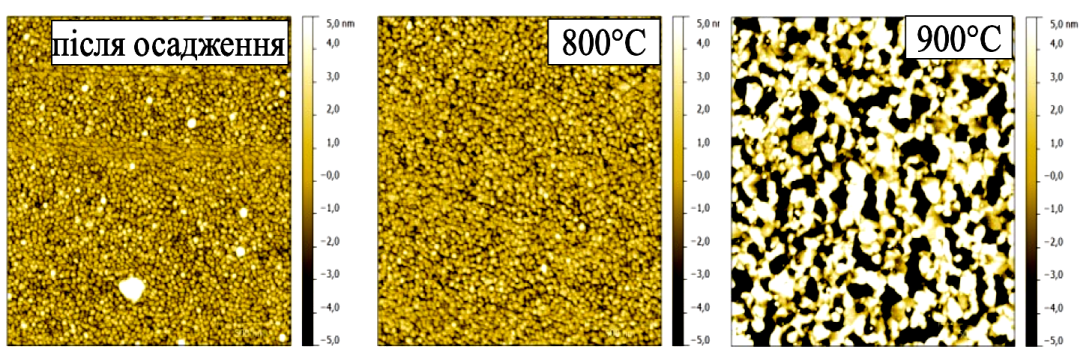
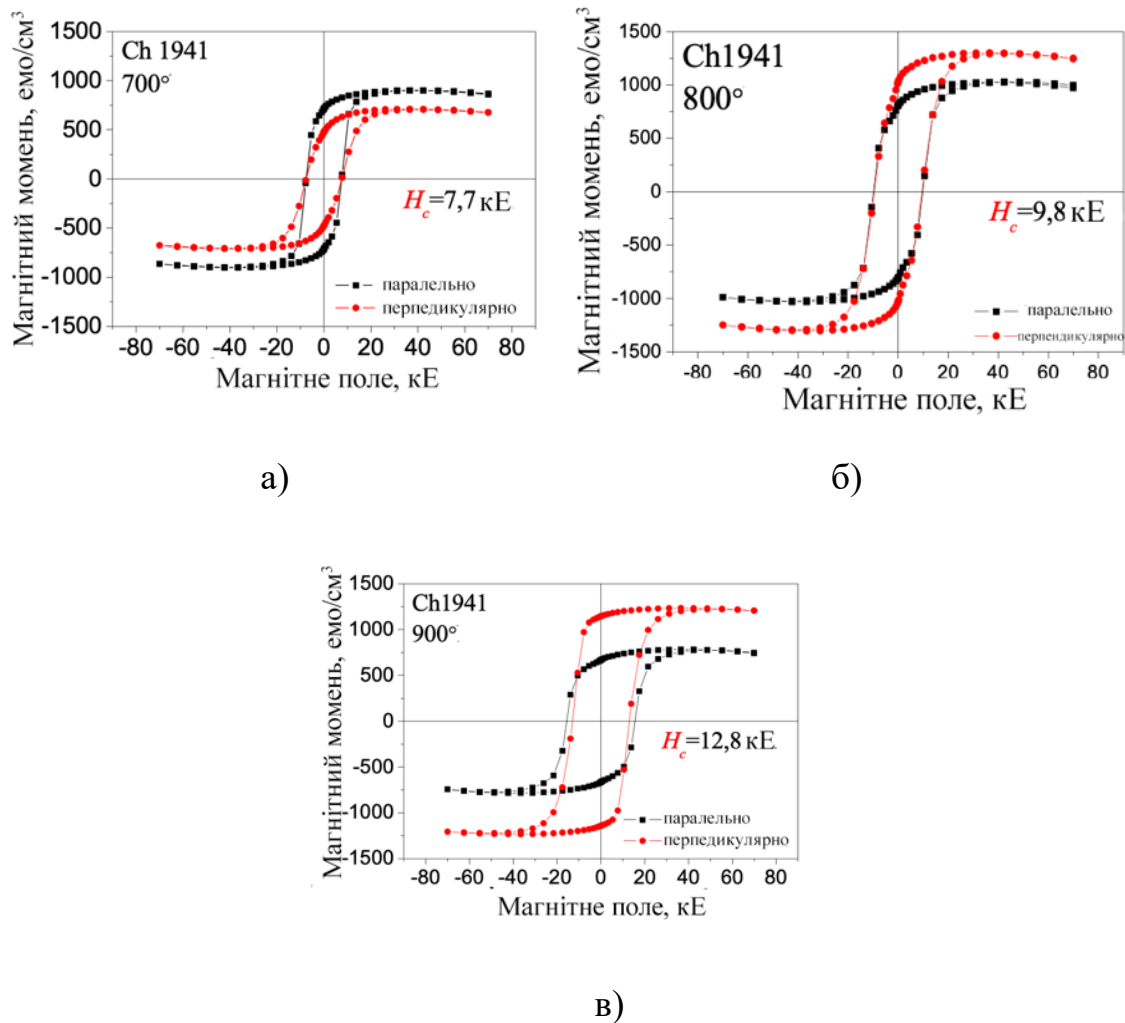


Рисунок 3.15 – Морфологія поверхні плівки Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Ag(7,5 нм) після осадження та відпалів у вакуумі

3.3 SQUID магнітометрія

На рисунку 3.16 показано криві намагнічування $M(H)$ в паралельно та перпендикулярно прикладеному до підкладки магнітному полі після відпалу у вакуумі плівок Fe₅₀Pt₅₀(15 нм).



а) 700°C , б) 800°C , в) 900°C

Рисунок 3.16 – Криві намагнічування $M(H)$ плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ (15 нм)

Після осадження в плівках формується магнітно-м'яка фаза $A1 \text{ FePt}$. Процеси структурно-фазових перетворень $A1 \rightarrow L1_0\text{-FePt}$ у плівках при відпалах супроводжуються зміною їх магнітних властивостей.

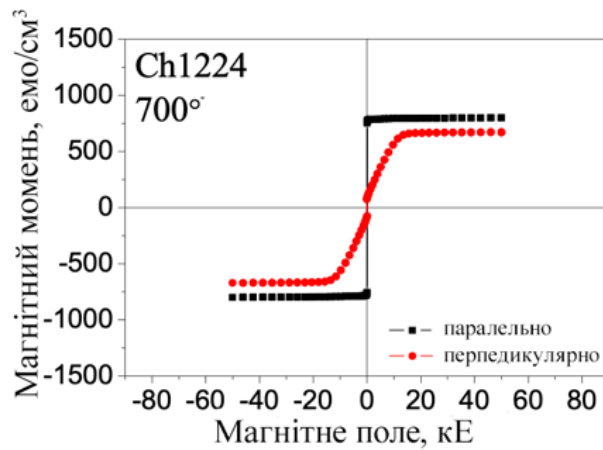
На рисунку 3.17 показано криві намагнічування $M(H)$ в паралельно та перпендикулярно прикладеному до підкладки магнітному полі після відпалу у вакуумі плівок $\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$.

Підвищення температури відпалу від 700°C до 900°C і формування магнітно-твердої фази $L1_0\text{-FePt}$ супроводжуються зміною магнітних властивостей плівок та призводять до збільшення коерцитивної сили.

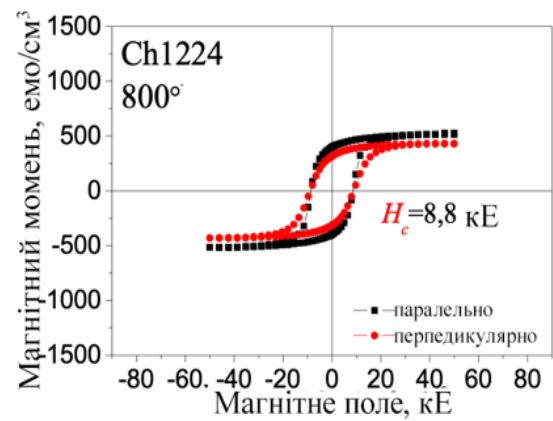
В плівкових композиціях з верхнім $\text{Ag}(15 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ зі збільшенням температури відпалу до 800°C у перпендикулярно площині

прикладеному магнітному полі коерцитивна сила становить 8,8 кЕ (рис. 3.17 б). При підвищенні температури відпалу до 900 °С у перпендикулярно площині прикладеному магнітному полі коерцитивна сила досягає 12,5 кЕ (рис. 3.17 в).

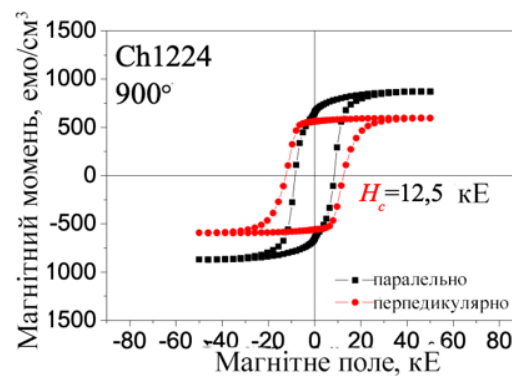
Збільшення значення коерцитивної сили при збільшенні температури відпалу можна пояснити збільшенням стискаючих напружень, які збільшуються через різницю у коефіцієнтах теплового розширення. Також зі збільшенням температури відпалу збільшується ступінь впорядкування так калькість магніто-твердої фази Ll_0 -FePt.



а)



б)



в)

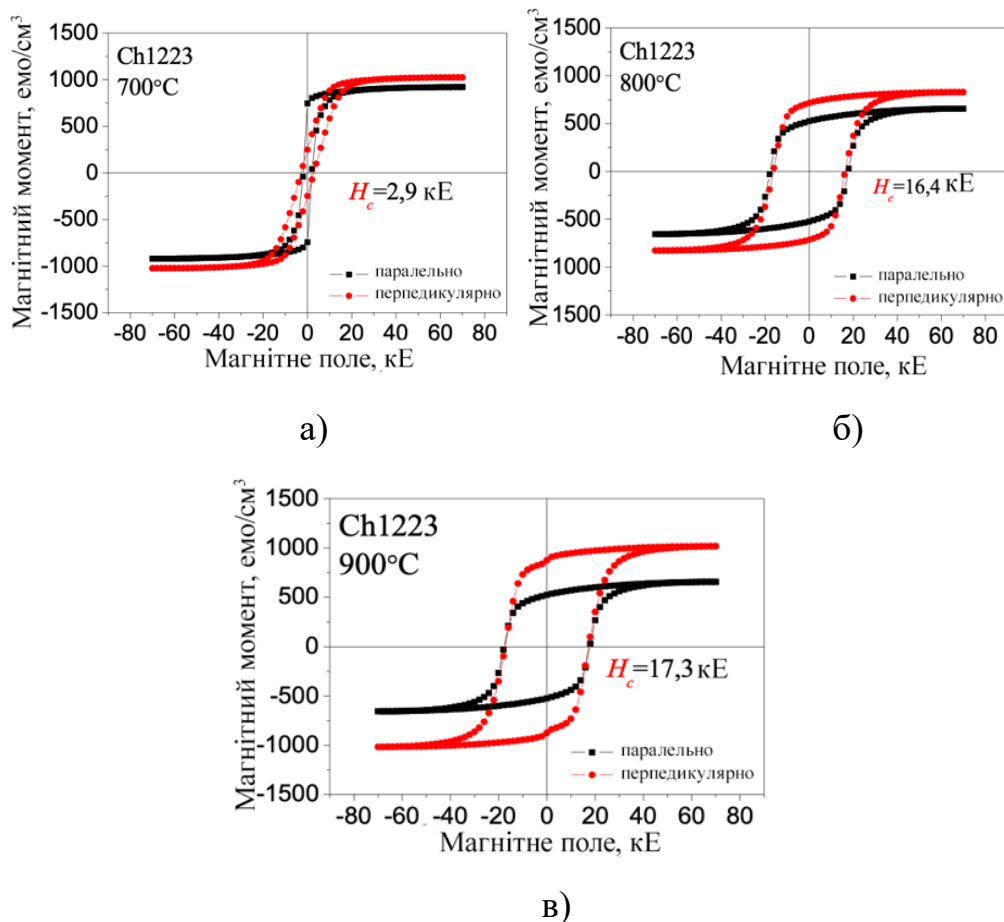
а) 700 °С, б) 800 °С, в) 900 °С

Рисунок 3.17 – Криві намагнічування $M(H)$ плівки

Ag(7,5 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)

Після відпалу за температури 600 °С плівка $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ (15 нм) набуває значень коерцитивної сили 0,61 кЕ, що вказує на початок формування магнітно-твердої фази $L1_0\text{--FePt}$. В плівках з додатковим шаром Ag (7,5 нм) формування впорядкованої фази відбувається на 100 °С пізніше, що більш виражено у плівках з проміжним шаром срібла (рис. 3.18). За температури відпалу 700 °С значення коерцитивної сили більш ніж вдвічі вище у плівці без срібла (7,7 кЕ), ніж у плівці з проміжним шаром срібла (2,9 кЕ) .

Кращі магнітні характеристики характерні для плівок з проміжним і нижнім додатковими шарами срібла (17,3 кЕ і 20 кЕ, відповідно), внаслідок більшого ступеню впорядкування та кількості магнітно-твердої фази $L1_0\text{--FePt}$ (рис. 3.18, в, рис.3.19).

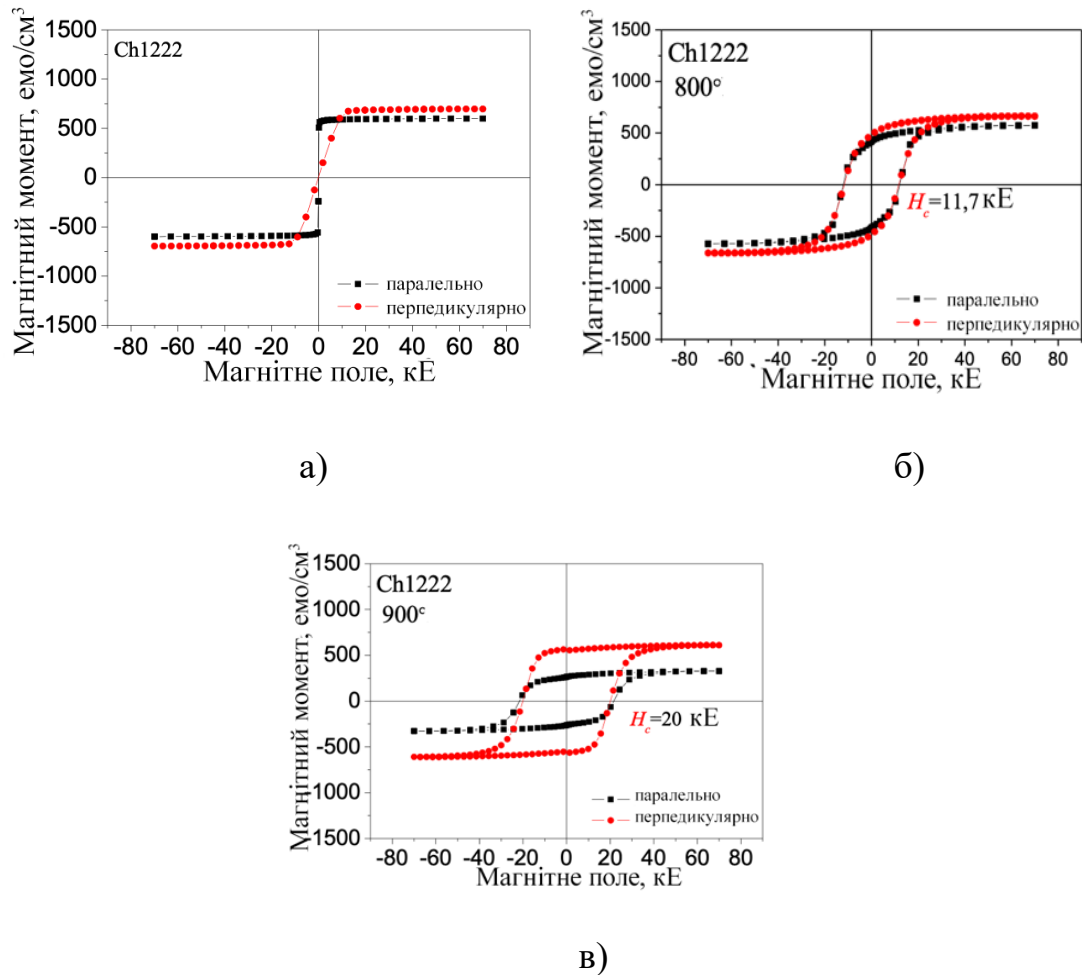


а) 700 °C, б) 800 °C, в) 900 °C

Рисунок 3.18 – Криві намагнічування $M(H)$ плівки $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ (15 нм)/ Ag (7,5 нм)/ $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ (15 нм)

Початковий напружений стан відіграє значну роль в процесах фазового перетворення $Al \rightarrow L1_0$ -FePt та впливає на температуру початку впорядкування. Менший рівень стискаючих напружень в композиції з верхнім шаром і невеликі розтягуючі напруження в композиції з нижнім шаром срібла призводять до підвищення температури початку фазового перетворення на 100 °С (до 800 °С).

Стискаючі напруження сприяють формуванню фази $L1_0$, яке відбувається зі зменшенням об'єму елементарної комірки, що віддзеркалюється в зниженні температури упорядкування в композиції з проміжним шаром Ag з найбільшим рівнем стискаючих напружень після осадження (рис. 3.20).



а) після осадження; б) 800 °С, в) 900 °С

Рисунок 3.19 – Криві намагнічування $M(H)$ плівки $Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})/Ag(7,5 \text{ нм})$

Таким чином, представлені результати свідчать про те, що термічна

обробка призводить до зміни структурно-фазового складу нанорозмірних плівок, який істотно впливає на його магнітні властивості.

Припускається, що введення додаткових шарів легуючих елементів з шарами сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ може сприяти прискоренню дифузійних процесів через напружений стан, який виникає в результаті невідповідності параметрів кристалічної будови шарів, а також різниці в їх температурних коефіцієнтах лінійного розширення. Ag має обмежену розчинність в ґратці FePt та відносно мале значення поверхневої енергії ($\sigma=1,12 \text{ Дж/м}^2$), що забезпечить його зернограничну дифузію в напрямку вільної поверхні при термічній обробці.

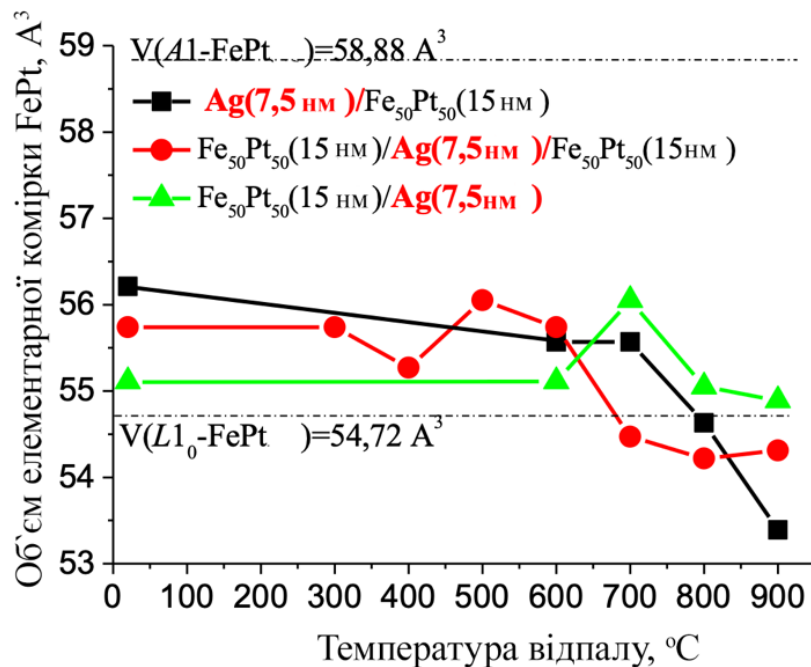


Рисунок 3.20 – Зміна об'єму елементарної комірки фази FePt у різних плівкових композиціях

Величина коерцитивної сили корелює зі значеннями залишкових напружень у плівках після високотемпературних відпалів. Великі стискаючі напруження сприяють збільшенню коерцитивної сили.

Насичення границь зерен фази $L1_0$ -FePt сріблом можуть сприяти збільшенню коерцитивної сили плівкових композицій через зменшення магнітної взаємодії між зернами даної фази (магнітну ізоляцію зерен).

3.4 Пошаровий хімічний аналіз плівкових композицій $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ та $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$

Методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток було виявлено, що в зразках після осадження спостерігаються чіткі границі розділу поміж шарами плівкових композицій $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ та $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ (рис.3.21, рис.3.22).

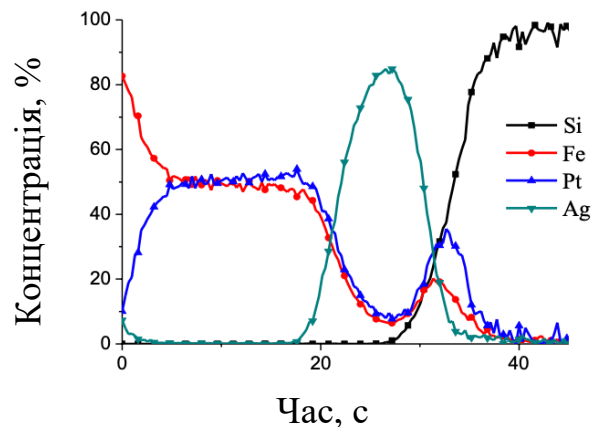


Рисунок 3.21 – Концентраційні розподіли в нанорозмірній плівковій композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ після осадження

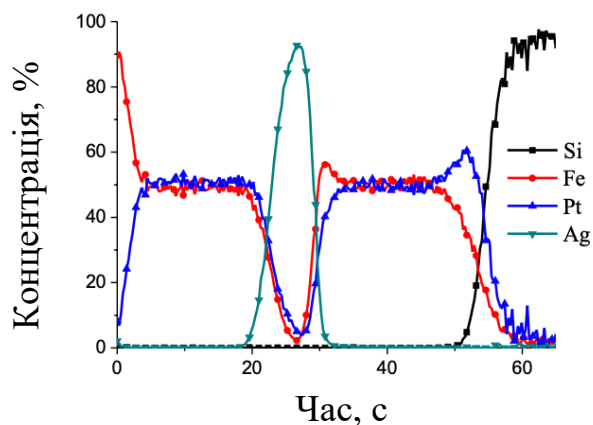


Рисунок 3.22 – Концентраційні розподіли в нанорозмірній плівковій композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ після осадження

Дифузія Ag при відпалі відбувається по границях зерен FePt у напрямку вільної поверхні, що підтверджується пошаровим хімічним аналізом після відпалу за температури 900 °C (рис. 3.23, 3.24). Біля поверхні плівок утворюється сегрегація срібла, більш виражена у плівці $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$, де більша концентрація Ag. Проте тривалості відпалу 30 с недостатньо для рівномірного перемішування шарів $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ та Ag. Більша кількість срібла залишається на межах поділу та біля поверхні плівок.

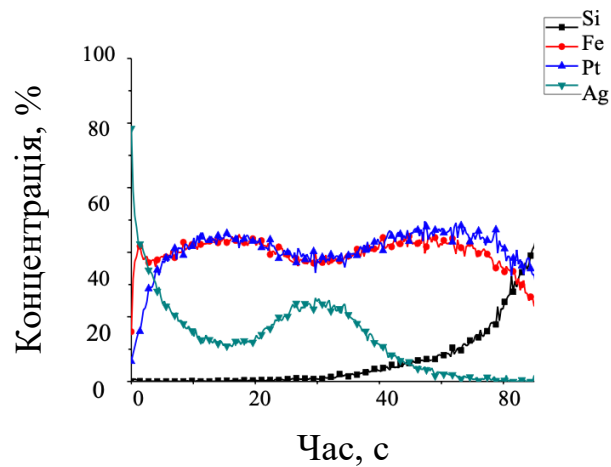


Рисунок 3.23 – Концентраційні розподіли в нанорозмірній плівковій композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ після відпалу за температури 900 °C

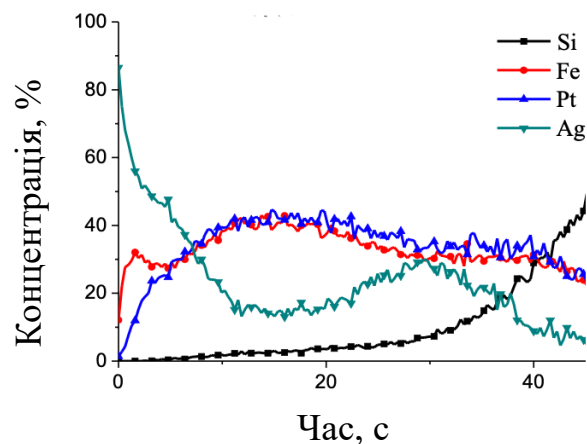


Рисунок 3.24 – Концентраційні розподіли в нанорозмірній плівковій композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(7,5 \text{ нм})$ після відпалу за температури 900 °C

Для виявлення впливу підкладки на напружений стан і процеси упорядкування у плівках, її було відокремлено та визначено зміни фазового складу у процесі нагріву при відпалі *in situ* у колоні електроннографу (рис. 3.25).

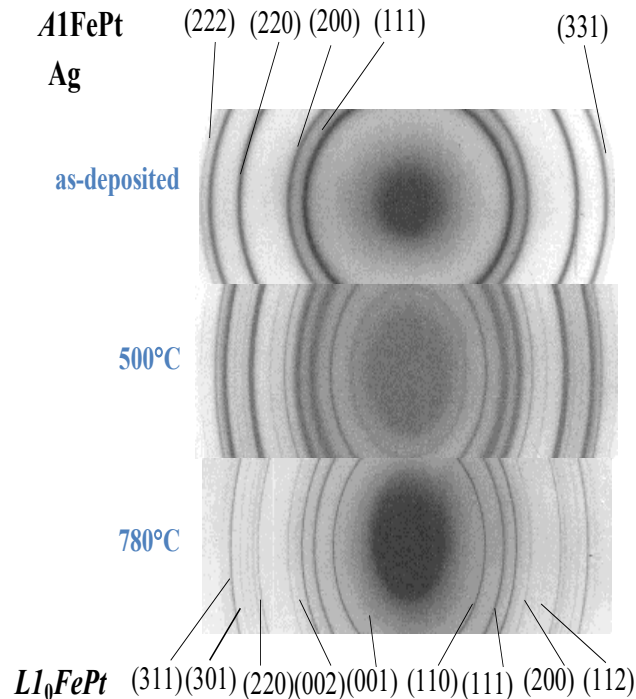


Рисунок 3.25 – Електроннограми нанорозмірної плівкової композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{nm})/\text{Ag}(7,5\text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{nm})$, відокремленої від підкладки при відпалі *in situ* у колоні електроннографу

Після осадження фазовий склад нанорозмірної плівкової композиції $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ nm})/\text{Ag}(7,5\text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ nm})$ складається з неупорядкованої фази $A1\text{-FePt}$ та срібла. Впорядкована фаза формується при відпалі за температури $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, про що вказує поява надструктурного рефлексу (001) . При підвищенні температури нагріву зменшується інтенсивність рефлексів, що належать фазі $A1\text{-FePt}$. При нагріві плівки до температури $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ крім фази $L1_0\text{-FePt}$ залишається незначна кількість неупорядкованої фази $A1\text{-FePt}$.

3.5 Висновки до розділу 3

Визначено, що після осадження у плівкових композиціях формується

невпорядкована фаза $A1(\text{FePt})$. Встановлено, що розташування шару срібла впливає на початковий напружений стан, а відповідно і на температуру початку формування упорядкованої фази $L1_0$. Фазовий перехід $A1 \rightarrow L1_0(\text{FePt})$ в плівках з проміжним шаром срібла 7,5 нм починається на 100 °C нижче, ніж в плівках з верхнім і нижнім шаром Ag.

Найбільш виражений орієнтаційний $[001]$ ріст зерен $L1_0(\text{FePt})$ відбувається в нанорозмірній плівковій композиції з верхнім шаром срібла.

В нанорозмірній плівковій композиції з проміжним шаром срібла, яка відокремлена від підкладки, процеси фазового переходу при відпалі «in situ» відбуваються при нижчій температурі, ніж в аналогічній композиції на підкладці, що пов'язано зі зміною напруженого стану (нейтралізація дії підкладки).

Визначено, що при нагріві плівки до температури 780 °C крім фази $L1_0\text{-FePt}$ залишається незначна кількість неупорядкованої фази $A1\text{-FePt}$.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає в розробці плівкового матеріалу з високими магнітними властивостями, що може бути використаний в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю (табл. 4.1).

Перспективними для даного стартап-проекту є нанорозмірні плівкові композиції FePt-Ag осаджені на підкладинках SiO₂/Si(001) та піддані подальшому відпалу у вакуумі в температурному режимі від 300 °C до 700 °C.

Оцінку ринкової спроможності даного матеріалу можна дати лише в обмеженому вигляді, оскільки дослідження структурно-фазового складу, а також властивостей даного плівкового матеріалу досі тривають.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка нових наноплівкових матеріалів для використання в якості носія магнітного запису з великою коерцитивною силою	Інформаційно-комп'ютерні технології	Збільшення строку зберігання інформації,
	Технології магнітного запису інформації	зменшення впливу зовнішніх чинників на записану на носій інформацію.

4.2 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження

Собівартість науково-дослідної роботи розраховувалась у відповідності з наступними калькуляційними статтями витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;

- вартість матеріалів;
- вартість обладнання;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

4.2.1 Визначення заробітної плати персоналу

Розрахунок заробітної плати науково-виробничого персоналу базується на визначенні трудомісткості робіт окремих виконавців та їх денної заробітної плати.

Під час проведення науково-дослідної роботи дослідження проводили чотири виконавці: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник, інженер-дослідник та технік. Для КПП ім. Ігоря Сікорського місячні посадові оклади заробітної плати складають:

- провідного наукового співробітника – 9944 грн.;
- старшого наукового співробітника – 5549 грн.;
- інженера-дослідника – 4548 грн.;
- технік – 4263 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на усереднену кількість днів в місяці, враховуючи що кількість робочих днів на тиждень становить 22. Отримаємо, що величина денної заробітної плати виконавців складає:

- для провідного наукового співробітника – 452 грн.;
- старшого наукового співробітника – 252 грн.;
- інженера-дослідника – 207 грн.;
- технік – 194 грн.

Трудомісткість виконання етапів науково-дослідної роботи наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Трудомісткість макроетапів виконання науково-дослідної роботи

Макроетапи науково-дослідної роботи	Трудомісткість, люд.-дні			
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік
1. Аналіз публікацій за темою	3	6	—	—
2. Обґрунтування мети та напрямів досліджень	2	2	—	—
3. Розробка методики проведення досліджень	3	4	10	—
4. Проведення експерименту:				
4.1 Відпал та резистометрія зразків	—	7	18	7
4.2 Рентгеноструктурний аналіз плівкових композицій	—	2	2	2
4.3 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток	—	2	4	4
4.4 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних іонів	—	2	4	4
5. Обговорення результатів	6	6	6	—
Всього	14	31	44	17

Величина фонду заробітної плати (ФЗП) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з виконавців:

$$\text{ФЗП} = 14 \times 452 + 31 \times 252 + 44 \times 207 + 17 \times 194 = 26586 \text{ грн.}$$

4.2.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок (B_c) складає 22 % від заробітної платні. $B_c = 0,22 \times 26586 = 5840,1$ грн.

4.2.3 Визначення вартості матеріалів

В даній науково-дослідній роботі використовувались зразки FePt-Ag, осаджені на підкладинки монокристалічного $\text{SiO}_2(100 \text{ nm})/\text{Si}(001)$. Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість основних матеріалів

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Зразки FePt-Ag	шт.	21	117	2457

Транспортно-заготівельні витрати становлять 10 % від вартості матеріалів.

Повна сума витрат на матеріали (C_m): $C_m = 2457 \times 1,1 = 2702,7$ грн.

4.2.4 Визначення вартості спеціального обладнання і приладів

Всі дослідження в науково-дослідній роботі виконувались на обладнанні, що наявне в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4.2.5 Визначення витрат на службові відрядження

Окремі службові відрядження не планувались під час проведення науково-дослідної роботи.

4.2.6 Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій

Послуги сторонніх організацій не використовувались під час виконання науково-дослідної роботи. Всі дослідження передбачені даною роботою виконувались в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4.2.7 Визначення інших прямих неврахованих витрат

Інші прямі невраховані витрати ($C_{\text{інш}}$) становлять 10 % від врахованих.

$$C_{\text{інш}} = 0,1 \times (26586 + 5840,1 + 2702,7) = 3512,88 \text{ грн.}$$

4.2.8 Визначення накладних витрат

Норматив відрахувань на накладні витрати (H_B) для КПІ ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 16 % планової суми прямих витрат на виконання науково-дослідної роботи.

$$H_B = 0,16 \times (26586 + 5840,1 + 2702,7 + 3512,88) = 6182,67 \text{ грн.}$$

4.2.9 Визначення планової кошторисної вартості науково-дослідної роботи

Планова кошторисна вартість науково-дослідної роботи визначається як сума витрат за окремими статтями вартості. Результати визначення вартості наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Планова кошторисна вартість науково-дослідної роботи

Назва калькуляційної статті	Позначення	Сума	
		грн.	%
1	2	3	4
1. Фонд заробітної плати виконавців теми	ФЗП	26586	59,31
2. Єдиний соціальний внесок	Вс	5840,1	13,02
3. Матеріали необхідні для виконання теми	См	2702,7	6,02
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	Соб	—	—
5. Роботи і послуги сторонніх організацій	Сстор	—	—

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4
6. Витрати на службові відрядження	$C_{\text{від}}$	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	$C_{\text{інш}}$	3512,88	7,83
8. Накладні витрати	H_B	6182,67	13,79
Всього		44824,35	100

Планова кошторисна вартість проведення науково-дослідної роботи за темою «Формування впорядкованої фази $L1_0$ в нанорозмірних плівках FePt-Ag.» становить 42576,8 грн.

В таблиці 4.5 наведено аналіз сильних, слабких та нейтральних сторін проекту у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 4.5 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			
		Даний проект	Конкурент 1 Seagate Technology	Конкурент 2 Western Digital	Конкурент 3 Toshiba
1	2	3	4	5	6
1	Собівартість нанорозмірної плівкової композиції	Дешевший	Дорожчий	Дорожчий	Дорожчий
		S	W	W	W
2	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5	6
3	Вартість установки для запису	Менша	Більша	Більша	Більша
		S	N	N	N
4	Намагніченість насичення	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N
5	Екологічність (обсяг відходів)	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали
		W	W	W	W

* W (слабка сторона), N (нейтральна сторона), S (сильна сторона)

Виходячи з характеристик наведених у табл. 4.5 можна зробити висновок, що головними техніко-економічними характеристиками, що формують конкурентоспроможність є собівартість плівкових композицій, а також вартість установки для запису інформації.

В таблиці 4.6 представлені технології, які були використані для виготовлення та термічної обробки експериментальних зразків.

Таблиця 4.6 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Технологія магнетронного осадження	Технологія існує	Доступна
Технологія низькотемпературного відпалу у вакуумі	Технологія існує	Доступна

Як видно з таблиці 4.6 запропонований проект можливо технологічно реалізувати, адже об'єкт даного дослідження (нанорозмірні плівкові композиції FePt-Ag) є лише малою частиною жорсткого диску. Є можливість спробувати записати інформацію на жорсткий диск, виготовлений на основі нанорозмірних плівкових композицій FePt-Ag після термічної обробки у вакуумі за допомогою

технології перпендикулярного магнітного запису.

На даний момент на світовому ринку виробництвом жорстких дисків займаються всього три компанії: Seagate Technology, Western Digital та Toshiba. Аналітична компанія Trendfocus оприлюднила результати дослідження світового ринку жорстких дисків за першу половину 2019 року.

Близько 77 млн жорстких дисків продано в першому кварталі 2019 року інформує Trendfocus. Зазначений результат виявився на 12% гірше в кварталному зіставленні, а ось щодо аналогічного періоду 2018 року спад досяг глибших 18%. Втім, порівняно з аналогічним періодом 2018 року спад зберігся і досяг 19%. Даний спад попиту на жорсткі диски аналітики пов'язують зі стрімким розвитком та зменшенням цін на твердотільні накопичувачі, які забезпечують вищу швидкість запису та обробки інформації.

В таблиці 4.7 наведено попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.7 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2	3
1	Кількість головних виробників, од	Виробництвом жорстких дисків зараз займаються всього три компанії: Seagate Technology; Western Digital; Toshiba;
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2019 рік	320 млн. од. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В 2020 році випуск комп'ютерних вінчестерів впаде до 305 млн. штук.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації	ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485

Продовження таблиці 4.7

1	2	3
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку)	> 1

У таблиці 4.8 наведено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 4.8 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Швидкість обробки інформації на жорстких дисках	Компанії які виготовляють жорсткі диски: - Western digital technologies inc;	Стандарти, Технічні регламенти, Специфікації, Обсяги закупок, Умови експлуатації	Висока щільність запису, низька собівартість, висока швидкість обробки інформації, висока надійність
2	Збільшення щільності запису інформації на диск	- Seagate; - Hitachi; - Fuji; - Toshiba; - SanDisk;		

Попередня оцінка ринку, проведена в таблиці 4.7, дозволяє зробити висновок, що входження на ринок з даним стартап-проектом цілком можливе, адже споживчий ринок вже повністю переорієнтувався на твердотільні накопичувачі. Виробники жорстких дисків давно зрозуміли цю тенденцію і також представляють свої прототипи нових запам'ятовуючих пристроїв. Однак

вінчестери прекрасно працюють в таких галузях як центри обробки даних, мережевих сховищах і системах відеоспостереження. Крім того, вони все ще дешевше SSD, тому застосовуються в комп'ютерах для зберігання великих обсягів даних або для здешевлення.

Впровадження даного проекту може сприяти покращенню ситуації на світовому ринку завдяки тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити швидкість запису і обробки даних, а також зменшити розміри носія.

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища (табл. 4.9 – 4.10): розроблені таблиці факторів загроз та можливостей реалізації проекту.

Таблиця 4.9 – Фактори загроз стартап-проекту

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність політичної та економічної ситуації	Зменшення попиту та інвестування	Приймання участі у програмах (локальних та міжнародних) для залучення додаткових інвестицій.
		Зменшення кількості ресурсів, ріст цін на вихідні матеріали	Перехід на інші види джерел енергії, залучення додаткових інвестицій.

В таблиці 4.11 представлено SWOT- аналіз сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз стартап-проекту.

Таблиця 4.10 – Фактори можливостей стартап-проекту

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	2	3	4
1	Зменшення собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів	Збільшення обсягу виробництва
2	Зменшення розміру жорсткого диску	Принципово нові можливості виготовлення комп'ютерів	Збільшення обсягу продажу.
3	Збільшення щільності запису інформації		

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - спрощення технології виготовлення жорсткого диску завдяки меншій температурі формування магнітно-твердої фази феромагнітного матеріалу ; - збільшення надійності зберігання інформації завдяки збільшенню коерцитивної сили.	Слабкі сторони: - структура композиції перешкоджає однорідному запису інформації; - необхідність проведення майбутніх досліджень та створення прототип.
Можливості: - можливість співпраці з виробниками жорстких дисків.	Загрози: - технологічна складність реалізації термічної обробки у вакуумі в промислових масштабах; - зменшення попиту на ринку жорстких дисків.

Дослідження плівкових композицій на основі системи FePt досі триває, тому оцінити ринкову спроможність та створити маркетингову модель товару неможливо. В науково-дослідній роботі досліджено: вплив режиму термічної обробки (тривалості термічної обробки при заданій температурі) та введення додаткового шару Ag на процеси структурно-фазових перетворень плівкових композицій. Так як дані нанорозмірні плівковій композиції все ще

досліджуються, вони є лише перспективними для використання в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю та великим строком зберігання інформації.

4.3 Висновки до розділу 4

Проведено оцінку ринкових можливостей стартап-проекту «розробка плівкового матеріалу з високими магнітними властивостями, що може бути використаний в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю». Впровадження даного проекту на світовий ринок є перспективним тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити швидкість запису і обробки даних, а також зменшити розміри носія. Для проведення повної оцінки ринкових можливостей даного проекту необхідно проведення подальших досліджень.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Мета розділу: проаналізувати небезпечні та шкідливі фактори, які викликають небезпеку ураження організму, умови, які можуть призвести до травмування в процесі дослідження процесів структуро- та фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Fe-Ag, та розробка заходів, спрямованих на усунення цих факторів.

Аналізуючи умови праці при виконанні магістерської дисертації потрібно розглянути наступні чинники:

- мікроклімат;
- склад повітря робочої зони;
- шум;
- вібрації;
- освітлення;
- виробниче випромінювання;
- електричний струм.

5.1 Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів

5.1.1 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату

Науково-дослідницька робота виконувалась на кафедр фізико-технічних технологій КПІ імені Ігоря Сікорського в корпусі №19, на 4 поверсі в лабораторії електронографії №403. Схема лабораторії представлена на рис. 5.1. Параметри робочої кімнати наведені нижче:

- розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 8 м, висота – 3,8 м.
- розміри вікон: ширина – 2,7 м, висота – 2,5 м.

Площа лабораторії, в якій працює троє чоловік складає 48 м², об'єм – 182 м³. Площа, яка приходить на одну людину – 16 м², об'єм ~ 60,7 м³. Таким чином, площа та об'єм лабораторії, згідно з ДсанПІН 3.32 - 007 - 98, де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м² площі та 20 м³ об'єму,

відповідають нормам [26].

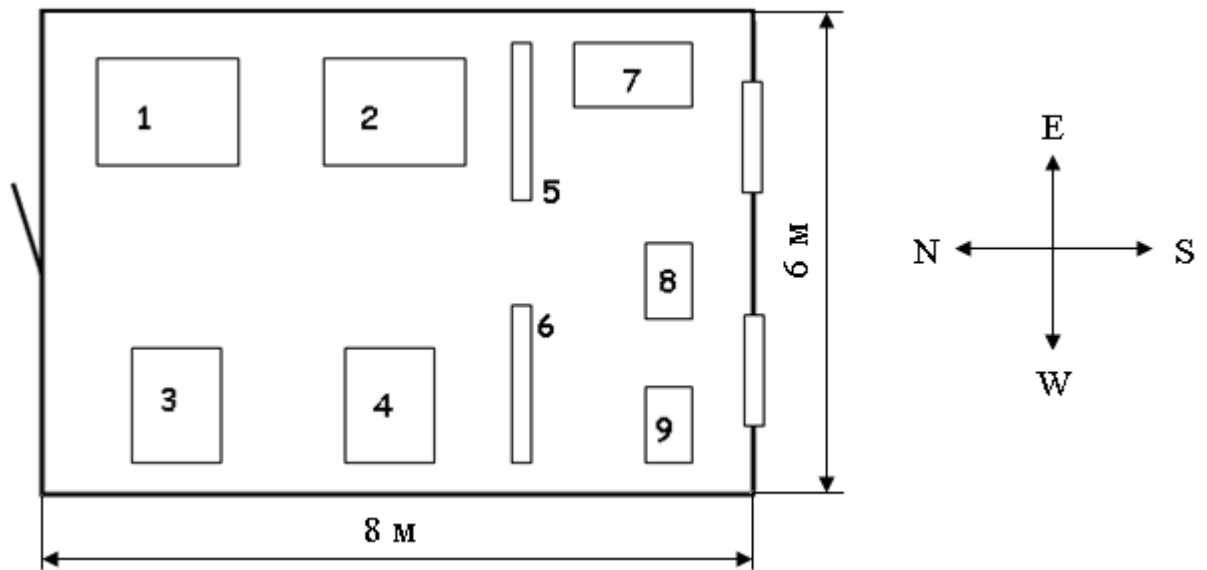


Рисунок 5.1 – Схема робочої лабораторії

В лабораторії знаходяться наступні установки:

1 - електроннограф ЕМР-100; 2 - електронний мікроскоп *ЕМВ-1 Л*; 3 - вакуумний універсальний пост ВУП-5М; 4 - шафа для інструментів; 5 - книжкова шафа; 6 - стіл письмовий; 7 - комп'ютер; 8 - комп'ютер; 9 - комп'ютер.

Для забезпечення оптимального мікроклімату встановлюють оптимальні і допустимі температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт у відповідності до «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 [27].

Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії №403 наведені в табл. 5.1.

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 категорія важкості робіт – I б, яка містить легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год та супроводжується деяким фізичним навантаженням, робота виконуються сидячи або стоячи.

Оптимальні умови мікроклімату – це поєднання параметрів, які при тривалому та системному впливі на людину забезпечують нормальний тепловий стан організму без активізації механізмів терморегуляції. Ці параметри забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для

високого рівня працездатності. Підтримання необхідного рівня параметрів мікроклімату забезпечується за допомогою водяного опалення в холодну пору року та провітрювання приміщення шляхом природного повітрообміну в теплу пору року[30].

Таблиця 5.1 – Мікроклімат лабораторії та ДСН 3.3.6.042-99

Період року	Категорія робіт	Температура, °С			Відносна вологість, %		
		Факт	Допуст	Оптим	Факт	Допуст	Оптим
Холодний	Легка	24	20-24	21-23	65	<75	40-60
Теплий	1 б	26	21-28	22-24	55	<65	40-60

Продовження таблиці 5.1

Період року	Категорія робіт	Швидкість руху повітря, м/с			Опалення	Вентиляція
		Факт	Допуст	Оптим		
Холодний	Легка	0,25	0,1-0,3	0,1	Водяне	Природна
Теплий	1 б	0,25	0,1-0,3	0,2		Природна

Основоючись на вище сказаному можна зробити висновок, що мікроклімат в робочій лабораторії відповідає вимогам санітарних норм.

5.1.2 Повітря робочої зони

Вміст шкідливих речовин та пилу в повітрі приміщення визначає його чистоту. Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не має перевищувати гранично допустимих концентрацій, що використовуються при проектуванні виробничих будівель, обладнання, технологічних процесів, вентиляції. За ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ встановлені гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони виробничих приміщень. Потрапляння до повітря робочої зони тих чи інших шкідливих речовин залежить від сировини,

що використовується та технологічного процесу [28].

В даній роботі не передбачені процеси полірування, шліфування та травлення, а також щодня проводиться вологе прибирання приміщення. Термічна обробка плівкових зразків проводиться у вакуумі, тому шкідливі випаровування, виводяться за межі лабораторії по спеціально облаштованим шлангам. Виходячи з цього можна стверджувати, що вміст шкідливих речовин та пилу в приміщенні не перевищує допустимих значень.

5.1.3 Аналіз наявності шуму

Джерелом шуму в лабораторії 403 є установка ВУП-5М.

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають в результаті ковалентного руху частинок у пружному середовищі. Під впливом шуму відбувається зменшення слухової чутливості. Стійка втрата слуху настає через п'ять-вісім років роботи за умов, що характеризуються високими рівнями шуму. Механізм впливу шуму слуховим шляхом носить назву кохлеарного, і він є переважним при рівнях нижче 110 дБ.

Найбільш ефективний засіб боротьби з шумом зменшення його в джерелі створення: заміна шумних технологічних процесів або обладнання малошумними, звуковбирання та звукоізоляція, екранування, використання глушників шуму, застосування малошумного обладнання, заміна металевих частин на пластмасу, установка глушників, установка обладнання на прокладках, установка "антизвуку", оснащення шумних машин засобами дистанційного та автоматичного управління, застосування засобів індивідуального захисту.

До індивідуальних засобів захисту від шуму відносять: протишумні навушники, вкладиші, шоломи, костюми, звукоізолюючі кабінки, акустичні екрани.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ГОСТ 12.1.003-86. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99.

5.1.4 Вібрації

Вібрація – це механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація є видом механічного впливу, що має негативні наслідки для організму.

Джерелами технологічної вібрації слугують стаціонарні електричні установки, вентилятори, насосні агрегати та ін. В науково-дослідній роботі джерелом вібрації виступала установка ВУП-5М.

Методом захисту від вібрації, з точки зору інженерії, є поглинання вібрації (віброгасіння). Машини з динамічним навантаженням (вентилятори, насосні агрегати), що є джерелом вібрації, встановлюють на окремі фундаменти. Джерела коливань ізолюються від опорних поверхонь гумовими, пружинними або комбінованими віброізоляторами.

Зменшення вібрації в джерелах їх виникнення приводить до підвищення точності опрацювання деталей, оптимізація технологічного процесу, поліпшення балансування.

Для поліпшення організації праці при вібронебезпечних процесах потрібно дотримуватись певних правил: загальна кількість робочого часу в контакті з віброобладнанням не повинна перевищувати зміни; одноразова дія не повинна перевищувати для локальної – 20 хвилин, для загальної – 40 хвилин.

До лікувально-профілактичних заходів відносяться: гідропроцедури, масаж, заходи, що загально укріплюють організм. Вібрація має властивість кумуляції (накопичення в організмі).

Засоби захисту від вібрації регламентуються державним стандартом ДСН 3.3.6.039-99. «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [29].

5.1.5 Електробезпека

Лабораторію №403, в якій проводилася науково-дослідницька робота відносять до приміщення без підвищеної небезпеки. Електричні прилади

живляться напругою 220 В (комп'ютери та орг. техніка, вольтметри) і 380 В (вакуумний універсальний пост) зі змінним струмом та частотою 50 Гц.

Під час виконання трудового процесу причинами враження електричним струмом можуть стати наступні причини:

- випадкове доторкання до частин, які перебувають під напругою, через відсутність засобів захисту приладів або безвідповідальне відношення до безпеки персоналу;
- дотик до частин електроприладів, які випадково потрапили під напругу через ушкодження ізоляції чи іншого ушкодження;
- потрапляння під напругу під час ремонтування приладів через помилкове їх включення під час ремонту.

Електричний струм носить негативний вплив на організм та може мати небезпечні для здоров'я людини наслідки, а також привести до смерті. При ураженні людини електричним струмом імовірність смертельного результату вища, ніж при інших причинах травматизму.

Струм 100 мА може призвести до смертельного результату.

У робочій лабораторії правильно виконане захисне заземлення електроприладів. Робочі місця розташовані так, щоб уникнути можливість одночасного доторкання до електроприладів [34].

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

1. забезпечення недоступності струмопровідних частин для випадкового дотику;
2. застосування електроенергії з безпечними величинами напруги;
3. усунення небезпеки ураження людей струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування;
4. застосування індивідуальних захисних засобів від ураження електричним струмом.

5.1.6 Виробниче випромінювання

Дані про виробничі випромінювання нормуються документом: Санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до відеодисплейних терміналів і ПЕОМ і організації роботи» ДСанПіН 3.3.2-007-98 [31].

При роботі з ЕОМ, яка входить в устаткування, виникає небезпека впливу на організм робітника: ультрафіолетового випромінювання, невикористаного рентгенівського випромінювання, електростатичного поля.

Для попередження соматичних та генетичних наслідків у відповідності з СП 1960-79 для побутової радіоелектронної апаратури (РЕА) встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання, яке не повинно перевищувати $2,78 \cdot 10^{-12}$ мкР/с (100 мкР/год) в будь-якій точці на відстані 5см від зовнішньої поверхні, яка обернена до оператора. Потужність експозиційної дози НРВ в будь-якій точці простору на відстані 0,05 м від корпусу установки не повинна перевищувати 0,07 мкР/с при робочому тижні 41 год. Враховуючи те, що робота більшою частиною проводиться за ЕОМ, запропоновано, щоб час роботи за монітором не перевищував 4 години за зміну [32].

5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

5.2.1 Вимоги до організації робочого місця

Вимоги до виробничих приміщень для експлуатації ПК, організації і обладнання робочих місць наведені в ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10. Конструкція робочого місця користувача ПК має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками: ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг; стегна – в горизонтальній площині; передпліччя – вертикально; лікті – під кутом 70° - 90° до вертикальної площини; зап'ястя зігнуті під кутом не більше 15° - 20° відносно вертикальної площини [34].

Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах (680-800) мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності

моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – (600-1400) мм, глибина – (800-1000) мм.[35]

Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм [36].

5.2.2 Вентиляція

Згідно з ДБН В.2.5-67:2013, місцева вентиляція повинна забезпечувати вилучення забрудненого повітря із зон виділення шкідливих речовин. В інших випадках допускається використання загальнообмінної вентиляції. Рекомендовано використання загальнообмінної вентиляції у поєднанні з місцевою вентиляцією, котра розрахована на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин нелокалізованих місцевими витяжними пристроями [33].

В даній науково-дослідній роботі проводився низькотемпературний відпал у вакуумі, тому можна стверджувати що виділення шкідливих речовин не відбувалось. Усі гази, що відкачувались з під вакуумного ковпака за допомогою форвакуумного насосу одразу виводились за межі лабораторії по спеціально облаштованим шлангам.

5.2.3 Аналіз освітленості приміщення

Можливість людини орієнтуватися у просторі, здійснювати фізіологічні функції, виконувати різні види робіт залежить від виду і якості освітлення навколишнього середовища.

Освітлення буває природне, штучне і суміщене. Найсприятливіше для людини природне освітлення. Природне освітлення може бути боковим, верхнім і комбінованим. Штучне освітлення поділяється за конструктивним виконанням – на загальне, місцеве і комбіноване; за функціональним призначенням – на робоче, аварійне, евакуаційне та охоронне.

Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зменшення продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски — тимчасове засліплення.

В робочій лабораторії наявні вікна з північного боку, які забезпечують природне бокове освітлення. Зовнішнє освітлення становить 10000 лк. Відстань між робочим місцем та вікном – 3 м. Оскільки розмір зразків не перевищує декількох міліметрів, то роботи можна віднести до роботи високої точності.

Освітлення у лабораторії штучне та природне. Для забезпечення штучного використовують люмінесцентні лампи розжарювання ЛБ-40 (24 одиниці).

5.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До небезпек, що можуть статися на виробництві, відносять: пожежі; вибухи (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); викид шкідливих речовин; розрив або руйнування обладнання; одночасне виникнення декількох з перелічених видів небезпеки. Для запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій і аварій у відповідності до положення.

5.3.1 Пожежна безпека

Приміщення лабораторії, в якій виконувалася науково-дослідницька робота, відноситься до категорії «В» за пожежонебезпекою (в лабораторії наявні горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини) відповідно до ОНТП 24-86. Найбільш пожежонебезпечними місцями є ті, де розміщено комп'ютерну техніку та місце з прокладеної електропроводкою. Загоряння може відбутися через коротке замикання в електропроводці[36].

У лабораторії присутні наступні засоби для гасіння пожежі:

- вода із загальної мережі водопроводу;
- порошкові вогнегасники.

Ступінь вогнетривкості споруди, в якому знаходяться лабораторія – І (з межею вогнетривкості більше 1,5 години).

Пожежа в лабораторії можлива при необережному поводженні з вогнем, порушенні технологічного режиму, конструктивних недоліках устаткування, несправності електроустаткування, неправильному користуванні устаткуванням. Тому необхідним є проведення робіт для ліквідації цих причин.

У лабораторії є вогнегасники ОУБ-2 (вуглекисотно-брометиловий). Напруга електропристроїв не більш ніж 1000 В, тому умови роботи задовольняють обмеженням на використання вогнегасників цих типів. Засобами виявлення й оповіщення про пожежу є автоматичні датчики-сигналізатори, що реагують на підвищення температури. Засобом оповіщення співробітників про пожежу служить внутрішній службовий зв'язок. У разі виникнення пожежі є план евакуації працівників з будівлі (рис. 5.2).

Підтримка високого рівня пожежної безпеки досягається завдяки дотримувannya планів перевірки електромереж та електроприладів, а також проведення своєчасної заміни та ремонтування електроустаткування.

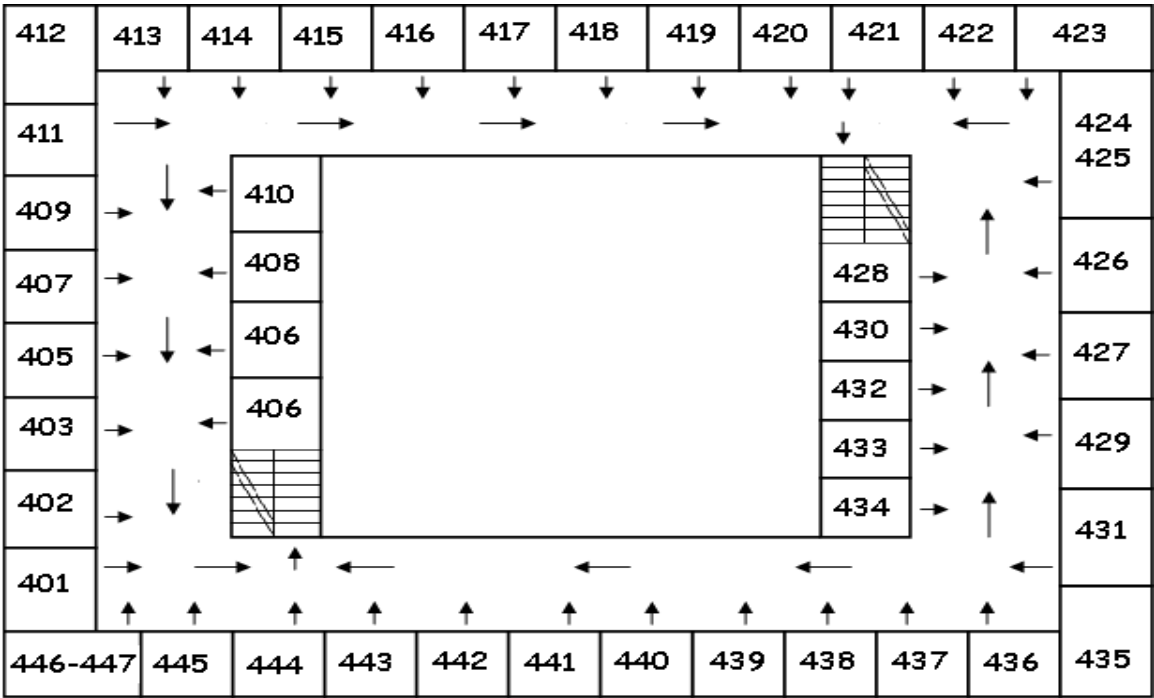


Рисунок 5.2 – План евакуації

5.3.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус вакуумної установки ВУП-5М необхідно відключити установку від мережі і довести до відома про це відповідальну особу за безпеку правці в лабораторії № 403.

У випадку ураження кого-небудь струмом, необхідно відключити установку від мережі, покласти потерпілого на рівну дерев'яну підлогу, підклавши під голову подушку, викликати швидку за телефоном 103 і, в разі необхідності, надати першу медичну допомогу.

У випадку загорання вакуумної установки необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів, передбачає умови, за яких може виникнути небезпека ураження організму.
2. Мікроклімат, організація робочого місця, освітлення в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. Рівень шуму та випромінювання не перевищує допустимих норм.

ВИСНОВКИ

1. Визначено, що після осадження у плівкових композиціях формується неупорядкована фаза $A1FePt$.
2. Встановлено, що розташування шару срібла впливає на початковий напружений стан, а відповідно і на температуру початку формування упорядкованої фази $L1_0$.
3. Фазовий перехід $A1 \rightarrow L1_0FePt$ в плівках з проміжним шаром срібла 7,5 нм починається за температури 700 °C, що на 100 °C нижче, ніж в плівках з верхнім і нижнім додатковим шаром Ag.
4. Встановлено, що в плівковій композиції, яка відокремлена від підкладки процеси фазового переходу $A1 \rightarrow L1_0FePt$ при відпалі «in situ» відбуваються при нижчій температурі ніж в аналогічній композиції на підкладці, що пов'язано зі стискаючими напруженнями при дифузії срібла по межах зерен.
5. Найбільш виражений орієнтаційний [001] ріст зерен $L1_0FePt$ відбувається в нанорозмірній плівковій композиції з верхнім шаром срібла при температурі відпалу 900 °C.
6. Впровадження даного проекту на світовий ринок є перспективним тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити стабільність збереження і обробки даних, а також зменшити розміри носія. Для проведення повної оцінки ринкових можливостей даного проекту необхідно проведення подальших досліджень.
7. Всі виконанні дослідження є екологічними і не є джерелом забруднення навколишнього середовища. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів, передбачає умови при яких може виникнути небезпека ураження організму.

CONCLUSIONS

1. In all as-deposited film compositions the chemically disordered $A1FePt$ phase in $FePt$ layer is formed.
2. It is established that location of Ag layer effects on strain/stress state in $FePt$ films and, respectively, on the temperature of ordered $L1_0$ phase formation.
3. The $A1 \rightarrow L1_0$ $FePt$ phase transition in films with intermediate Ag (7,5 nm) layer begins at an annealing temperature of 700 °C that on 100°C lower than in the films with top Ag layer and Ag underlayer.
4. It is established that in the film composition, which is separated from the substrate, the $A1 \rightarrow L1_0$ $FePt$ phase transition processes during annealing «in situ» occur at a lower temperature than in the similar composition on the substrate, which is associated with compressive stresses during silver diffusion along the $L1_0$ $FePt$ grains.
5. The most pronounced orientation growth of $L1_0$ $FePt$ grains occurs in a nanoscale film composition with a top layer of silver at an annealing temperature of 900 °C.
6. The introduction of this project into the world market is promising because the increase in the density of recording information allows to increase the stability of data storage and processing, as well as reduce the size of the media. Further studies are needed to fully assess the market potential of this project.
7. All studies performed are environmentally friendly and are not a source of environmental pollution. The analysis of harmful and dangerous factors, assumes the conditions under which the danger of damage to the body may occur.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Карпенков С. Магнитные накопители/ С. Карпенков // Новые технологии. – 2000. – №5. – С. 27-28
2. Радаев А. HDD будущего: перпендикулярная запись и не только / А. Радаев, Е. Пугач // Физические основы ЭВМ – Режим доступа: <http://comp.ilc.edu.ru>. – Дата доступа: 25.09.19
3. Леонов В. Развитие технологии записи на магнитный диск / В. Леонов // КомпьютерПресс. – 2003. – 3. – Р.3.
4. Шубский П. Магнитные хроники. История жестких дисков/ П. Шубский // Игромания. – 2013. – №9. – С.192.
5. MAgnetic recording: advancing into the future/ A. Moser, K. Takano, D. T. Margulies [and etc.] // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2002. – 41. - S. R157.
6. Новые накопители – что день грядущий нам несет?// Хабрахабр – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/etegro/blog/238535/> – Дата доступа: 25.02.2018
7. PiramanayAgam S.N. Recording media research for future hard disk drives/ S.N. PiramanayAgam, K. Srinivasan //Journal of MAgnetism and MAgnetic Materials. – 2009. – 321. – P. 485-494.
8. Synthetic FerromAgnetic media for over 100 Gbit/in² longitudinal mAgnetic recording / B.R. Achraya, A. Inomanta, E.N. Abarra [and etc.] // Journal of mAgnetism and mAgnetic materials. – 2003. – No. 260. – P. 261-272.
9. Wood R. Perpendicular MAgnetic Recording Technology / R. Wood, Y. Hsu, M. Shultz // Hitachi Global StorAge Technologies. – 2007.
10. Технологии записи на магнитные диски // Пятифан – Режим доступа: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=36169/> – Дата доступа: 25.09.19
11. Achraya B.R. SNR improvements for advanced longitudinal recording media / B.R. Achraya, E.N. Abarra, I. Okamoto // IEEE transactions on mAgnetics. – 2001. – 37. – P.1475-1477.

12. Бех І.І. Фізичні основи комп'ютерної електроніки/ І.І. Бех , С.М. Левицький // Київ: Карбон, 2010. – С.203-210.
13. Mark H. Kryder. Future StorAge Technologies: A Look Beyond the Horizon. Presentation. Computerworld. StorAge Networking World/ Mark H. Kryder. – April 3-6, 2006 – Manchester Grand Hyatt. San Diego, California. – P. 350-358.
14. История развития жесткого диска – Режим доступа: <http://303.su/stati/istoriya-razvitie-zhestkogo-diska-hdd>– Дата доступа: 25.09.19
15. Подгорная Е. А. Современные методы записи сигналов/ Подгорная Е. А. // СПб.: изд.СПбГУКиТ. – 2010. – С. 57-60.
16. IEEE Xplore – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc11/jproc-EDobisz-2007600/article.html – Дата доступа: 25.05.19
17. IEEE Xplore – Режим доступа: <http://nanotechweb.org/cws/article/lab/46784> – Дата доступа: 25.09.19
18. Disk recording beyond 100Gb/in²: hybrid recording? / J. J. M Ruigrok, R. Coehoorn, S. R. Cumpson, and H. W. Kesteren // J. Appl. Phys. – 2000. – 87. – P. 5398-5403.
19. Annealing behavior of mAgnetic anisotropy in CoNbZr films / M. Miura, H. Katahashi, K. Muramori, M. Kajiyama // IEEE transactions on mAgnetics. – 1988. – 24. – P.2215-2220.
20. Uesaka Y. Noise from underlayer of perpendicular mAgnetic recording medium / Y. Uesaka // Journal of applied physics. – 1985. – 57. – P.3925-3927.
21. Bertero G.A. OPTimization of granular double-layer perpendicular media / G.A. Bertero // IEEE transactions on mAgnetics. – 2002. – 38. – P.1627- 1631.
22. Батавин В.В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев / В.В. Батавин // Электроника. – № 9. – С. 6 –14.
23. IEEE Xplore – Режим доступа: [http://www.asmicro.com/Equipment/Dimension-3000\(ASM-1900\).htm](http://www.asmicro.com/Equipment/Dimension-3000(ASM-1900).htm) – Дата доступа: 25.05.19

24. Основи охорони праці/Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М.// Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 264 с. ISBN 978-966-364-934-4
25. Безпека життєдіяльності: Навч. Посібник / За ред. В.Г. Цапка – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Знання-Прес, 2003. – 397 с.
26. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. – 2-ге вид., стер. / Художнє оформлення К.І. Мозкова, В.Б. Гайдабус. – Суми: ВТД “Університетська книга”, 2004. – 301 с.
27. Безпека життєдіяльності: Курс лекцій. / Є.П. Желібо, А.І. Чмир, В.С. Троян, Є.О. Савінов – Ірпінь: Академія ДПС України, 2001. – 356 с.
28. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
29. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
30. Основи охорони праці. / М.П. Купчик, М.П. Гандзюк, І.Ф. Степанець [та інші] // Основа, 2000. - 416с.
31. Чирва В.С. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. / В.С. Чирва, Л.Г. Баб’як // Одеса: Глобус, 2005. – 2-ге вид. — 412 с.
32. Гайченко В.А. Основи безпеки життєдіяльності людини / В.А. Гайченко, Г.М. Коваль. // Київ: МАІП, 2002.-230с.
33. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.
34. Джигирей В.С. Безпека життєдіяльності/В.С. Джигирей, В.Н. Жидецький. Львів: Афіша, 2001.-255с.
35. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності/ Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний. Львів: Новий світ, 2002.-330с.
36. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності/Є.П. Желібо, В.В. Зацарний. Київ. «Каравела». 2009-279с.